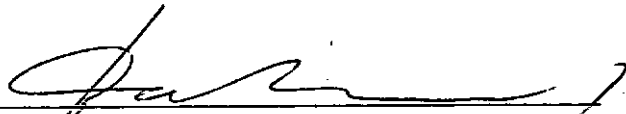


PROPRIEDADES DE SOLOS VERMELHOS
DO ESTADO DA PARAÍBA


FRANCISCO BARBOSA DE LUCENA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JA
NEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.).

Aprovado por:



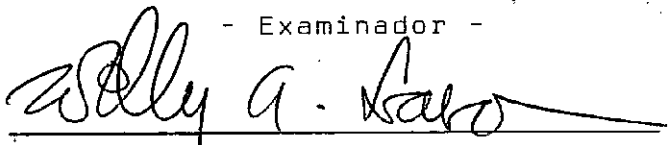
Prof. JOSÉ GERMANI CABRERA
- Presidente -



Prof. JACQUES DE MEDINA
- Examinador -



Prof. MAURO LUCIO GUEDES WERNECK
- Examinador -



Prof. WILLY ALVARENGA LACERDA
- Examinador -

A Analúcia e Luciana pelo
sacrifício a que foram submetidas
para que este trabalho fosse
se concretizado.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor J. G. CABRERA, Ph.D da Universidade de Leeds, Inglaterra, Cooperante do Conselho Britânico, pela orientação, contínua assistência e grande estímulo que me transmitiu para a elaboração deste trabalho.

Ao Professor LYNALDO CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE a quem devo o incentivo inicial para ingressar no programa de mestrado, ainda quando ocupava aquele mestre o cargo de Diretor da Escola Politécnica de Campina Grande.

À Direção do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, especialmente aos Professores JOSÉ SILVINO SOBRINHO e HEBER CARLOS FERREIRA, pelo apoio que me deram para a concretização da Tese.

À COPPE, à SUDENE, à ATECEL que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso deste trabalho.

Ao Professor STENIO LOPES pela eficiente ajuda na revisão dos originais e ao Professor SIYANBOLA MALOMO, pela solicitude com que me ajudou na obtenção de dados mineralógicos e interpretação dos mesmos.

Aos funcionários Ailton A. Diniz, Mozaniel Gomes e Windson Ramos, por sua parcela de contribuição.

Aos meus pais pelo sacrifício dispendido durante os meus estudos.

A NATUREZA E PROPRIEDADES DOS SOLOS VERMELHOS
DO ESTADO DA PARAÍBA, BRASIL

Dissertação de Mestrado

de

FRANCISCO BARBOSA DE LUCENA

SUMÁRIO

O estudo realizado durante esta investigação apresenta uma análise crítica da definição, gênese e classificação dos solos vermelhos lateríticos. Com base nessa análise, é sugerida uma definição e é indicada uma classificação útil do ponto de vista da Engenharia Civil.

É apresentado um estudo de campo e de laboratório, de três solos selecionados das formações geológicas de Barreiras e da Serra dos Martins.

A partir do estudo de campo é formulada uma teoria sobre a formação dos três depósitos e posteriormente comprovada pelas propriedades desses solos determinadas no laboratório.

O estudo de laboratório consistiu de: análise química, análise térmica (diferencial e termogravimétrica) microscopia eletrônica de varredura e determinação da superfície específica.

As amostras para o estudo foram arbitrariamente separadas em concreções e frações de solos e estas posteriormente divididas em quatro graduações de tamanhos. Foram realizados testes em todas as amostras obtidas pela separação nas diferentes graduações de tamanhos.

Os resultados permitiram estudar a distribuição de sílica, alumina e óxidos de ferro, como uma função do tamanho das partículas. É demonstrado que os óxidos de ferro e a sílica amorfa são os principais aglomerantes e que goetita, hematita, pré-hematita e óxidos de ferro amorfos, assim como a caulinita, aparecem como principais componentes, na maioria das amostras correspondentes as diferentes graduações.

O estudo da micro-estrutura revelou principalmente distribuição geométrica desordenada com agregações cimentadas por materiais amorfos. As formas arredondadas típicas do estágio de pré-hematita, foram encontradas na maioria das amostras concretadas e a estrutura interna da pré-hematita foi revelada muito claramente.

Algumas propriedades tecnológicas foram estudadas à luz da natureza dos solos lateríticos e foram formulados mecanismos qualitativos para explicar essas propriedades.

THE NATURE AND PROPERTIES OF THE RED SOILS OF
PARAIBA STATE, BRAZIL

M.Sc. Dissertation

by

Francisco Barbosa de Lucena

ABSTRACT

The study carried out during this investigation presents a critical review on the definition, genesis and classification of laterized red soils. Based on this review a definition is suggested and a useful classification from the civil engineering point of view is indicated.

A field and laboratory study of three soils selected from the geological formations of Barreiras and Serra dos Martins is presented.

From the field study, a theory of formation for the three deposits is formulated and later substantiated by the laboratory study on the properties of these soils.

The laboratory study consisted of: chemical analysis, thermal analysis, both differential and termogravimetry, scanning

electron microscopy and determination of specific surface.

The samples for the study were arbitrarily separated in concretion and soil fractions and these further divided in four size ranges. Tests were carried out on all the specimens obtained by separation in the different size ranges.

The results allowed to study the distribution of silica, alumina and iron oxides as a function of size. It is shown that iron oxides and amorphous silica are the main cementing agents and that goethite, hematite, prehematite and amorphous iron oxides are present as main components, as well as kaolinite in most of the specimens corresponding to different size ranges.

The study of microstructure revealed mostly random geometrical arrangements with aggregations cemented by the amorphous materials. The round shapes, typical of the prehematite stages, were found in most of the concretion specimens and the internal structure of prehematite was very clearly revealed.

Some engineering properties were studied on the light of the nature of the laterized soils and qualitative mechanisms were formulated to explain these properties.

ÍNDICE

| | | |
|------------|--|----|
| CAPÍTULO 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| CAPÍTULO 2 | OBJETIVO DA PESQUISA | 4 |
| CAPÍTULO 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| | 3.1. Introdução | 5 |
| | 3.2. Definição de Solos Vermelhos Tropicais | 5 |
| | 3.3. Origem e Formação | 10 |
| | 3.4. Classificação | 20 |
| CAPÍTULO 4 | FORMAÇÃO DOS SOLOS DO ESTADO DA PARAÍBA E DESCRIÇÃO DE OCORRÊNCIAS ESTUDADAS. | 39 |
| | 4.1. Dados Gerais | 39 |
| | 4.1.1. Situação | 39 |
| | 4.1.2. Hidrologia e Relevo | 42 |
| | 4.1.3. Geologia e materiais originários | 45 |
| | 4.1.4. Clima | 45 |
| | 4.2. Jazidas Seleccionadas para Estudo | 47 |
| | 4.2.1. Jazida Sapê-Mari | 49 |
| | 4.2.2. Jazidas Cuité e Nova Floresta | 52 |
| CAPÍTULO 5 | COLETA E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS PARA UTILI- ZAÇÃO NA PESQUISA | 57 |
| | 5.1. Coleta dos Materiais | 57 |
| | 5.1.1. Amostragem da Jazida Cuité | 57 |
| | 5.1.2. Amostragem da Jazida Nova Floresta. | 59 |
| | 5.1.3. Amostragem da Jazida Sapê-Mari | 59 |
| | 5.2. Preparação dos Materiais no Laboratório | 62 |

| | | |
|------------|---|-----|
| CAPÍTULO 6 | MÉTODOS DE ENSAIOS | 66 |
| | 6.1. Introdução | 66 |
| | 6.2. Análise Química | 68 |
| | 6.3. Análise Térmica | 68 |
| | 6.3.1. Análise Térmica Diferencial | 69 |
| | 6.3.2. Análise Termogravimétrica | 70 |
| | 6.4. Difração de Raios-X | 71 |
| | 6.5. Microscopia Eletrônica de Varredura | 73 |
| | 6.6. Área Específica | 74 |
| CAPÍTULO 7 | APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS | 76 |
| | 7.1. Introdução | 76 |
| | 7.2. Análise Química | 77 |
| | 7.2.1. Jazidas Cuité e Nova Floresta | 78 |
| | 7.2.2. Jazida de Sapé-Mari | 79 |
| | 7.3. Análise Térmica | 85 |
| | 7.3.1. Análise Térmica Diferencial (A.T.D.) | 85 |
| | 7.3.2. Análise Termogravimétrica e Diferencial Termogravimétrica | 86 |
| | 7.4. Difração de Raios-X | 90 |
| | 7.5. Microscopia Eletrônica de Varredura | 91 |
| | 7.5.1. Fase Sólida | 91 |
| | 7.5.2. Fase Vazios | 92 |
| | 7.6. Área Específica | 92 |
| | 7.7. Propriedades de Engenharia | 94 |
| CAPÍTULO 8 | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 132 |
| | 8.1. Introdução | 132 |
| | 8.2. Resultados da Análise Química | 132 |
| | 8.3. Resultados da Análise Mineralógica | 136 |
| | 8.4. Análise da Microestrutura | 138 |
| | 8.5. Análise da Área Específica | 139 |
| | 8.6. Propriedades de Engenharia dos Ma teriais Estudados | 140 |

| | | | |
|----------|----|--|-----|
| CAPÍTULO | 9 | CONCLUSÕES | 144 |
| CAPÍTULO | 10 | SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS | 147 |
| | | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 149 |
| | | APÊNDICE | 155 |
| APÊNDICE | A | MÉTODOS DE ANÁLISE QUÍMICA | 156 |
| APÊNDICE | B | TABELAS DE RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA | 171 |
| APÊNDICE | C | DIFRATOGRAMAS DE RAIOS-X | 175 |
| APÊNDICE | D | PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA O <u>ES</u> TUDO NO MICROSCOPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA | 190 |
| APÊNDICE | E | MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA ÁREA ESPECÍFICA | 192 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A utilização generalizada de solos tropicais vermelhos como materiais de construção, em diversas obras de engenharia e particularmente na pavimentação de estradas e aeroportos, tem motivado engenheiros e pesquisadores a estudarem as suas propriedades, numa tentativa de coletar dados suficientes de tal maneira que se possa predizer o comportamento de engenharia dos mesmos dentro de um grau de segurança compatível com as normas e especificações geralmente adotadas.

A grande predominância da estrutura empírica que forma o corpo sólido da Mecânica dos Solos tem aumentado consideravelmente, sobretudo levando-se em consideração experiências com solos originados pelos processos de intemperismo de climas temperados. Portanto a aplicação de tal estrutura ao estudo do comportamento de solos sujeitos ao intemperismo tropical tem provado ser de validade limitada.

Uma das características que diferenciam solos de climas temperados e tropicais, relacionadas com o aspecto puramente físico, é o fato de que alguns solos tropicais pertencem à classe de estruturas metaestáveis (1). Isto quer dizer que sua natureza particulada (particulate nature) não é estável sob certas condições, por exemplo sob a influência de um campo de tensões. Em contraste, solos de regiões temperadas, com exceção de argilas rápidas e certos loess, têm estruturas particuladas estáveis sob as mesmas condições. Por isso a utilização de ensaios clássicos de ca

racterização (distribuição granulométrica e limites de consistência), como único meio de classificação, tem se tornado de validade duvidosa (2).

Outro aspecto de fundamental importância que diferencia solos desenvolvidos nas regiões temperadas e tropicais, é a sua composição química. Os solos desenvolvidos através do processo de "laterização", que envolve perda de bases e silicatos primários com acumulação de óxidos secundários de ferro e alumínio e uma presença marcante de quartzo e minerais argílicos do tipo caulinita (3), têm certamente uma constituição química muito diferente da dos solos de regiões temperadas, que provavelmente afetam sua estrutura e influenciam consequentemente o comportamento de engenharia do material.

Muito embora uma grande quantidade de pesquisas tenham sido realizada com o objetivo de definir as propriedades dos solos desenvolvidos pelo processo de laterização, existe ainda uma grande falta de conhecimentos que preencha o vazio e relacione as propriedades intrínsecas (física, química, mineralógica e físico-química) com as de engenharia. Vários pesquisadores, considerando a magnitude do assunto, têm procurado dar ênfase a este ponto. Little (2) ao abordar o problema, levando em consideração o aspecto da importância das lateritas, sugeriu que a pesquisa fosse coordenada em âmbito mundial, para que se pudesse conseguir um resultado satisfatório nesse campo.

No Brasil, conforme se tem conhecimento, existem grandes áreas cobertas por solos que são produtos de diferentes graus de intensidade do processo de laterização; assim os gigantescos programas de desenvolvimento e integração, envolvendo uma diversificação da gama de obras de engenharia, abrangendo de maneira mais acentuada a rede rodoviária nacional, têm mostrado a necessidade premente de se estudar em maior profundidade estes materiais. Como resultado positivo de esforços coordenados convém ressaltar as especificações elaboradas pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (4), orientando o uso de solos lateríticos em construção de rodovias. Apesar do caráter experimental das citadas especificações, representam elas um passo inicial resultante da experiência de engenheiros que trabalham neste país. Por outro lado, o governo brasileiro con

tratou uma firma de consultoria internacional - a "Lyons Associates", - para realizar um estudo limitado sobre as propriedades de "solos lateríticos" do Brasil (5).

Isto demonstra, sem dúvida alguma, que o Brasil como outros países de áreas tropicais reconhece a necessidade urgente de estudos que envolvam as propriedades de solos tropicais sujeitos a intemperismo.

CAPÍTULO 2

OBJETIVO DA PESQUISA

A primeira parte deste trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica crítica envolvendo os aspectos de definição, origem e formação, e classificação de solos vermelhos tropicais desenvolvidos por um processo de intemperismo tropical de "laterização".

A segunda parte consiste de um estudo de campo de três formações de solos vermelhos que ocorrem nos Municípios de Cuité, Nova Floresta e Sapé, no Estado da Paraíba.

A terceira e última parte envolve um estudo detalhado de laboratório para a determinação das propriedades Físicas, Químicas e Mineralógicas dos três solos obtidos das jazidas existentes nas formações indicadas. Além de mais procede-se um estudo qualitativo das características microestruturais destes solos e utilizam-se dados sobre suas propriedades de engenharia, obtidos por outros investigadores, para ilustrar a importância das propriedades intrínsecas destes solos no seu comportamento como materiais para o uso em estruturas de Engenharia Civil.

Os métodos de análise utilizados consistem de: análise química, análise térmica, diferencial e termogravimétrica, difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura e área específica.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Introdução

Mesmo levando-se em consideração o esforço que se tem feito no sentido de se definir e caracterizar melhor os solos vermelhos, encontrados em regiões tropicais, existe ainda uma grande disparidade de idéias que permitam uma definição e classificação universalmente aceitável.

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo tem como objetivo principal mostrar a diversificação ainda persistente envolvendo as partes definição, origem e formação e classificação dos solos vermelhos.

3.2. Definição de Solos Vermelhos Tropicais

Analisando parte da literatura disponível, pode-se verificar a grande polêmica que tem sido gerada em torno do termo laterita, introduzido inicialmente por Buchanan em 1807, com a finalidade de descrever um material vermelho existente na região sul da Índia, o qual podia ser cortado em blocos e apresentava a característica especial de endurecimento quando em exposição ao ar. Estes blocos eram utilizados na construção civil em substituição ao tijolo, do latim "later" (tijolo), derivando-se desta maneira o no

me (6).

Não somente o aspecto restritivo da definição de Buchanan, a sua apresentação incompleta e o aparecimento de solos semelhantes noutras regiões tropicais, mas sobretudo o uso generalizado de vários critérios, tomados como base para definição da laterita, têm provocado grande confusão e trazido, como consequência, uma contribuição negativa para a solução do problema, que atravessa mais de um século, sem que se chegue a um denominador universal comum. A dificuldade é aumentada tendo em vista as variadas características de engenharia apresentadas pelos solos tropicais, fortemente influenciados por diversos fatores ligados ao meio ambiente, rocha de formação, temperatura, precipitação, umidade etc.

São inúmeras as definições de laterita, sendo que grande parte delas são imprecisas e estribadas em critérios diversos. Estas assumem diferentes graus de importância de acordo com o campo de especialidade do cientista que sugere uma definição, assim, pedólogos, geologistas, engenheiros etc. apresentam sugestões de definições concernentes a sua especialidade e que satisfazem um propósito limitado.

Em 1898, Max Bauer, segundo Novais Ferreira (7), admitiu que as lateritas dos países tropicais, qualquer que fosse a rocha de origem, seriam constituídas, além dos restos de rochas ainda não atacadas, por hidróxidos de ferro, alumínio e titânio, em percentagens que variam com a composição da rocha de origem.

Em 1903, Holland (8) fazia referência que a alumina existia sob a forma de hidróxido na laterita assim como na bauxita. Nesse mesmo ano, E. H. Warth e F. J. Warth (9) afirmavam que a laterita é a bauxita em vários graus de pureza.

Fermor (10), em 1911, define laterita como sendo resultante da decomposição superficial experimentada por determinadas rochas, com remoção em solução da combinação sílica, cálcio, magnésio, sódio e potássio, e com acumulação residual, assistida, sem dúvida, pela ação capilar, substituição e troca de uma mistura hidratada de óxidos de ferro, alumínio e titânio, raramente com magnésio. Estes óxidos são designados de constituintes lateríticos.

Lacroix (11), em 1913, reconhecendo que os hidróxi
dos de ferro se encontram frequentemente livres, o mesmo não ocor
rendo com os de alumínio, fixa quatro tipos de solos, dos quais só
os três últimos são lateríticos ou têm tendência para tal:

- a) Sialite - contendo até 10% de hidróxidos de Fe + Al;
- b) Sialite laterítica - contendo 10 a 50% de hi
dróxido de Fe + Al;
- c) Laterita sialítica - contendo entre 50 a 90% de
hidróxidos de Fe + Al;
- d) Laterita alítica - contendo mais que 90% de hi
dróxidos de Fe + Al.

Harrassowitz (12), em 1926, conforme citá Novais Ferre
reira (7), propõe a relação molecular sílica/alumina como meio úni
co de caracterizar o estado de laterização de uma formação móvel
(solo).

Seguindo a mesma orientação, Martin e Doyne (13), em
1927, classificam como laterita exclusivamente os solos cuja rela
ção molecular sílica/alumina é inferior a 1,33.

Winterkorn (14), em 1951, apresenta uma classifica
ção baseada na relação sílica/sesquióxidos de ferro e de alumínio
da fração tamanho argila (menor que 2 μ).

Em 1967, Morin e Parry (15) também levaram em consi
deração a definição de laterita com base no enriquecimento de oxi
dos de ferro e alumínio com lixiviação de sílica e dizem: "isto in
clui a maior parte dos solos vermelhos de intemperismo tropical".

Correia, Antunes e Teixeira (16), em 1967, têm discu
tido definições de laterita e adotam índices químicos para designar
laterita, solo de laterita, solo laterítico, terreno laterítico e
cascalho laterítico.

Pendleton (17), em 1936, insiste, em muitos dos seus
trabalhos, na necessidade de limitar o termo laterita à acepção de
Buchanan.

As especificações de serviços do Departamento Naciou

nal de Estradas de Rodagem (4) definem solos lateríticos como sendo aqueles cuja relação molecular sílica/sesquióxidos for menor que 2 e apresente expansão inferior a 0,2%, medida no ensaio I.S.C. com 26 ou 56 golpes por camada.

Em 1949, Kellogg (18) emprega o termo laterita restringindo o uso aos materiais ferruginosos que em certos solos tropicais são susceptíveis de endurecer quando em exposição, e os seus restos fósseis. Ele indica quatro formas de materiais ricos em sesquióxidos, quais sejam:

1. Argilas brandas que se tornam duras ou em forma de crosta quando expostas;
2. Argila endurecida;
3. Concreções;
4. Concreções consolidadas (cascões).

Ainda em 1949, Kellogg (18) usa a denominação de latosolo para todos os solos zonais das regiões tropicais e equatorial, de cor vermelha ou avermelhada, que tivessem as características seguintes:

- a) Fração argila apresentando baixa relação sílica/sesquióxidos e baixa atividade;
- b) Baixo teor de materiais solúveis;
- c) Baixo teor de materiais primários, exceto aqueles altamente resistentes;
- d) Relativo grau de agregação.

Du Prez (19), em 1949, aceita a posição de Kellogg (18) e de Pendleton (17), que consideram a laterita como sinônimo de concreção ou material concrecionável.

Refere-se Fox (20), em 1950, que laterita é reconhecida como uma curiaça residual, produto de intemperismo de rochas semelhantes como basaltos, granitos e gnaisses.

Em 1951, G. W. Robinson (7) introduz o termo ferralítico como sinônimo de laterítico (no sentido de latosolo).

Uma definição mais moderna para solos lateríticos adotada pelo Road Research Laboratory (21) é a seguinte:

Laterita é um solo tropical no qual o processo de meteorização resulta em uma acumulação de sesquióxidos particularmente de ferro.

Em 1962, conforme Santana (22), Herbillon e Gastuche consideram ferralitização como sinônimo de meteorização laterítica, definida como um processo de decomposição total das rochas com lixiviação da sílica e acumulação de óxidos e hidróxidos de ferro, alumínio e titânio.

Alexander e Cady (23), em 1962, definem laterita como um material altamente intemperizado, rico em óxidos secundários de ferro e alumínio ou ambos, quase isento de bases e silicatos primários, mas podendo conter grandes quantidades de quartzo e caulinita. Ela é dura ou capaz de endurecer em exposição a molhagem e secagem. Grant (24), por outro lado, define laterita como sendo um material no qual há uma marcante acumulação e frequentemente segregação de óxidos secundários de ferro (alguns óxidos de alumínio estão também sempre presentes) e é capaz de endurecer-se formando "ferricrete" em oxidação e ou forte desidratação.

A partir de 1966, U.S.D.A. (25), introduz o termo "Plinthes" (tijolo em grego) como sendo um material não rijo ou fracamente rijo formado pela laterização incompleta de solos que apresentam composição química e mineralógica semelhante à laterita. Ele ocorre frequentemente formando fracos nódulos em argila e difere das lateritas somente no que se refere à rigidez. Quando em exposição a molhagem, pode endurecer da mesma forma que a laterita.

De Graft Johnson (26), por sua vez, define laterita como sendo um solo residual ou coluvial, normalmente de cor vermelha e geralmente formado sob condições tropicais, enriquecido em óxidos de ferro ou de alumínio, ou ambos, com lixiviação de sílica; tal material inclui concreções endurecidas de graduações diferentes. Esta definição geral naturalmente inclui um grande número de solos residuais ou coluvionares com diferentes propriedades de engenharia, entretanto deixa de fora aqueles que não são ricos em

óxidos de ferro e alumínio.

Tyrrel (27) define laterita como sendo um material concrecionado rijo e poroso, que cobre amplas áreas nas terras tropicais e sub-tropicais, formando uma certa superfície dura sobre rochas ricas em ferro e alumínio; geralmente consiste de uma mistura de óxido de ferro hidratado, com hidróxidos de alumínio em várias proporções e frequentemente com dióxidos de manganês e titânio e sílica livre.

Little (2) apresenta como proposição a seguinte definição para laterita:

Rochas ígneas tropicais, desgastadas "in situ", as quais estão decompostas parcialmente ou totalmente, com uma concentração de sesquióxidos de ferro ou alumínio, havendo dispêndio de sílica.

O resultado da ação isolada de grupos de pesquisadores tentando resolver o problema da definição de solos lateríticos, sem uma coordenação de âmbito universal, tem motivado como consequência a não existência de um conceito geral que satisfaça a técnicos e cientistas e que seja aceito mundialmente. Tal conceito deveria envolver não somente as características de engenharia do material, mas também levar em conta as propriedades intrínsecas deste, satisfazendo, portanto, aqueles que se interessam pela estrutura do mesmo. Assim sendo, e considerando-se que a adoção de uma definição rígida não seria de maior utilidade do ponto de vista da Engenharia Civil, em virtude da grande variedade de comportamento dos solos vermelhos, parece mais adequado propor-se uma definição generalizada, que satisfaça aqueles que utilizam esses materiais na construção civil, indicando somente a característica principal que diferencia solos temperados de solos tropicais. Desta maneira para o Engenheiro "solos vermelhos" são aqueles produzidos por um processo de laterização.

3.3. Origem e Formação

Como se tem conhecimento, os solos e pedregulhos são

produtos resultantes do desgaste das rochas, por meio de ações físicas e químicas, influenciadas por um número complexo de fatores, tais como: Clima, Geologia, Topografia, Relevo, Precipitação d'água etc.

A forma de desgaste conhecida como desgaste físico inclui os efeitos produzidos pelos processos abrasivos, expansão e contração. O desgaste físico gera produtos finais que consistem de blocos angulares, pedras redondas, pedregulhos, areia, silte e rocha esfarinhada na fração tamanho argila, os quais apresentam como mineral constituinte exatamente aquele da rocha originária. O desgaste químico por outro lado resulta da decomposição da rocha e formação de novos minerais (28).

Os agentes de desgastes próximos à superfície, os quais tomam parte nas reações químicas com os minerais primários da rocha, incluem água, oxigênio, dióxido de carbono e óxidos orgânicos derivados da vegetação. Estão incluídos dentro dos vários processos químicos a hidratação, hidrólise, oxidação e carbonatação. Todos estes podem operar simultaneamente, alguns com maior rapidez e outros agindo mais efetivamente na alteração do mineral (28).

Quando o material resultante da alteração permanece no local onde se formou, tem-se o solo residual. Quando é transportado e depositado afastado da rocha de origem, tem-se o solo transportado; dependendo do tipo de agente transportador, tem-se o solo aluvionar ou sedimentar, eólico, coluvionar e de talos e glacial. Mas pode-se ter, também, solo residual formado a partir de sedimentos coluviões etc, pela alteração dos minerais dos blocos, pedregulhos e frações mais finas. Existe um outro tipo de solo formado "in situ", mas que não resulta da alteração de rocha - é o solo orgânico que provém da acumulação de restos de organismos vegetais e animais (29).

Tem-se verificado que nos climas tropicais a tendência de decomposição química é para a formação de hidróxido de ferro ou de alumínio ou ambos. A este processo dá-se o nome de "laterização", designando-se o produto como laterita. Os solos desenvolvidos por tal processo, que envolve perda de bases e silicatos primários com acumulação de óxidos secundários de ferro e alumínio e marcante

presença de quartzo e minerais argílicos do tipo caulinita (3), apresenta com certeza uma constituição química, bastante diferente dos solos de regiões temperadas. Quando ocorre que a rocha-mãe é rica em alumínio, o produto resultante da laterização recebe o nome de bauxita (30).

As propriedades de engenharia de solos vermelhos tropicais são influenciadas consideravelmente pelos fatores: formação do solo, grau de intemperismo, características morfológicas, composição química e mineralógica, como também pelas condições do meio ambiente.

A origem e formação representam provavelmente a parte mais controvertida do estudo destes solos. Várias teorias foram surgindo com o decorrer do tempo, com a finalidade de esclarecer o assunto. Maignien (31) distingue três períodos diferentes abrangendo sua evolução:

- a) Um período inicial, quando foi feita uma tentativa para descrever a morfologia das lateritas em relação ao modo de ocorrência, na primeira metade do século dezanove;
- b) Um período envolvendo tentativa de se dar uma visão mais profunda dos constituintes da laterita em termos de química e mineralogia, iniciado no fim do século dezanove e continuado até bem recentemente;
- c) Um período final, no qual os métodos modernos da ciência experimental dos solos têm servido de instrumento para o estudo da origem das lateritas.

Lake (32), descrevendo as lateritas de Malabar, dá um sumário das hipóteses iniciais na formação das lateritas, quais sejam:

- 1. Laterita é um material residual, isto é, formado "in situ";
- 2. Laterita é um produto sedimentar;

3. Laterita é de origem vulcânica.

As suposições de formação mencionadas anteriormente surgiram através de observações efetuadas no campo sobre a natureza das lateritas. A idéia inicial considera a morfologia, forma e aparência "in situ". Por outro lado, considerações sobre grandes espessuras de formações lateríticas, existentes acima de rochas diferentes, conduziram a uma indicação de uma provável origem sedimentar. A apresentação em forma de escória, de aspecto usualmente endurcido, como massas uniformes do basalto de Deccan Plateau na Índia, serviu como base para a Teoria da origem vulcânica. Segundo Prescott e Pendleton (33) Hanlon discutiu o problema da formação de bauxitas das rochas vulcânicas terciárias em New South Wales. De acordo com Hanlon, na maioria dos depósitos teria havido pequenos movimentos entre a alumina e o óxido de ferro e a laterização tinha consistido essencialmente de remoção da sílica, cal, magnésio e de álcalis. Borshad e Rojas Cruz - citam ainda Prescott e Pendleton (33) - descreveram um perfil podzólico da Colômbia, o qual mostra algumas das características de uma laterita e argumentam que no caso o alumínio livre existente pode provavelmente ser considerado como originário da cinza vulcânica, da qual o solo foi derivado.

Fermor (10) reconheceu um tipo especial de ocorrência de laterita como tendo sido possivelmente formado sob condições lacustres, a qual foi consequentemente denominada por ele de "laterita de lago". O registro feito por Newbold, citado por Prescott e Pendleton (33), de camadas lateríticas como terraços planos nos sopés de colinas graníticas em direção à região de Magulbundi, permite supor que elas podem perfeitamente ter esta característica. Muitas ocorrências Australianas, de acordo com estudiosos do assunto, parecem se enquadrar nesta classe, notadamente aquelas da bacia terciária da Launceston na Tasmânia, ocorrências no território da capital Australiana e nas vizinhanças do porto Lincoln, Sul da Austrália.

Uma outra característica da laterita tem sido reconhecida desde os primeiros dias e tem representado uma importante parte no desenvolvimento de certas teorias com relação a sua origem, é que ela não é normalmente um material transportado, mas que

é formada "in situ", existindo, desta maneira, uma relação de grande afinidade com as formações rochosas subjacentes (33).

Pratas (34) apresentou um trabalho relacionado com um processo de laterização, em curso na baixada de Jangamo, Moçambique, no decorrer do qual foi verificado que a aspiração pelas plantas de água contendo em solução teores elevados de bicarbonato ferroso origina núcleos lateríticos por posterior oxidação dos sais ferrosos.

As primeiras sugestões modernas relacionadas com a origem da laterita, segundo Prescott e Pendleton (33), aparecem com Russells. Ele foi provavelmente, segundo os autores, o primeiro geólogo a enfatizar o fato de que nos climas tropicais e temperados, quentes e úmidos, a percolação d'água através da rocha tem grande poder de dissolução e é capaz de exercer sua influência durante todo o ano, e que a decomposição superficial é mais rápida nas regiões quentes que nas regiões frias, e que é muito maior nos climas úmidos do que nos áridos.

O primeiro trabalho importante desenvolvendo muitas idéias predominantes relacionadas com a natureza e origem das lateritas, foi, sem dúvida, de acordo com Prescott e Pendleton (33), o de Bauer, o qual discutia a natureza química e mineralógica das lateritas de Seychelles. A sua contribuição teve como resultado uma considerável soma de discussões, nos anos subsequentes, sobre o assunto. Levando em consideração a parte geológica, teve-se Holland (8) e, voltado para a pedologia, Glinka, resultando em virtude da grande autoridade dos trabalhos apresentados a orientação seguida nos trinta anos seguintes. A discussão aberta por Holland foi continuada até 1911, quando Fermor (10) divulgou com alguns detalhes a natureza da laterita e sumarizou a opinião então conservada.

A opinião de Holland, expressa através de seus trabalhos, é que durante a meteorização de alumínio-silicatos em regiões tropicais a sílica, álcalis e terras alcalinas são removidas em solução enquanto que óxidos de alumínio e óxidos de ferro tornam-se hidratados e permanecem atrás mecanicamente misturados muitas vezes com pseudomorfos das estruturas minerais da rocha. Ele apresentou uma interessante sugestão que possivelmente bactérias de ferro rela

cionadas com cremothrix e cladothrix, e organismos similares podem possivelmente desempenhar um papel na aceleração. Ele igualmente sugeriu que a laterização pode incluir-se na "longa lista de enfermidades tropicais contra as quais nem mesmo as rochas estão seguras".

Harrison (35) igualmente considera laterita como um produto de intemperismo das rochas, na qual a decomposição química dos silicatos tem resultado na formação de sílica secundária, alumínio e óxidos de ferro em formas mais ou menos hidratadas. Por outro lado, ele não aceita a afirmação de que a produção da caulinita é sempre devida a mudanças radicais no processo de meteorização.

Relevante contribuição relacionada com a possível origem da laterita é aquela apresentada por Campbell, segundo Prescott e Pendleton (33), o qual tinha observado laterita no campo, em diversos países. Ele fez uma distinção entre os processos de alteração e "intemperismo" nas rochas, e salientou que a laterita era essencialmente uma precipitação e não um produto residual. Campbell reconhece que muitas formações lateríticas eram de origem antiga, mas não rejeita os processos correntes de formação. Para ele o processo de alteração é a decomposição que se verifica em rochas cristalinas abaixo do nível d'água do solo na zona "água de Vadosa".

A opinião de Campbell foi sumariada na expressão "laterita não é derivada (no sentido estrito da palavra) de uma rocha, mas é o resultado da remoção gradual da maior parte do material da rocha original e da gradual deposição, em seu lugar, dos constituintes lateríticos das soluções que passam". Ele considerou estes constituintes lateríticos dissolvidos como sendo essencialmente aluminatos e bicarbonatos ferrosos, entretanto a concepção moderna consideraria estes pontos de vista como incompatíveis.

Outra teoria sugerida por Simpsons (1912) - - citam Prescott e Pendleton - é de que as crostas superficiais da laterita são essencialmente eflorações como um resultado da evaporação na superfície do solo das soluções que conduzem sais de ferro trazidos à superfície por ascensão capilar.

Foi também sugerido por Maclaren em 1906 e por Men-
nell em 1909 - referem Prescott e Pendleton (33) - que alternância de

estação úmida e seca era uma importante característica dos climas associada com a formação de laterita. MacLaren também foi favorável à teoria do levantamento capilar.

Whitehouse, {ainda Prescott e Pendleton, (33)} em sua discussão sobre as lateritas de Queensland ocidental, sugeriu que a zona ferruginosa era originalmente um horizonte fluvial, mas que devia sua concentração de compostos de ferro tanto às concentrações para cima quanto às concentrações para baixo. Ele supôs um período seco como tendo precedido as condições de fortes precipitações, necessário para a formação de lateritas. Durante este período, o lençol seria profundo, mas, depois do ataque das chuvas, o lençol d'água seria elevado, enquanto os horizontes superficiais seriam simultaneamente sujeitos à lixiviação. A sugestão de Whitehouse foi, portanto, "que à medida que o lençol d'água sobe e prevalecem as condições redutoras, o ferro era concentrado em núcleos crescentes na direção para cima". O seu ponto de vista de que as zonas ferruginosas dos perfis de laterita são o horizonte fluvial exposto de um resto de solo, exposto por erosão, estão de acordo com as idéias de Prescott e de Mohr refere-se mais uma vez Prescott e Pendleton (33).

Estas opiniões mantidas até recentemente têm sido responsáveis pela formulação da classificação de solos lateríticos com base na relação de sílica/alumina na fração argila. Elas foram bem sumarizadas por Scrivenor (36) descrevendo o fenômeno de laterização como sendo a formação do hidrato de alumínio a partir de silicatos como produto final do intemperismo em lugar de considerá-los como produto final do processo de intemperismo em climas temperados.

Duas teorias principais de alteração têm sido propostas, até o presente, considerando a gênese das lateritas. Estas são teorias de acumulação, sintetizadas por D'Hoore em 1954 - cita Maig nien (31), o qual mostrou que dois processos podem ser assinalados.

a) Concentração de sesquióxidos pela remoção de sílica e bases-acumulação relativa;

b) Concentração de sesquióxidos pela acumulação atra

vés do perfil ou entre perfis: acumulação absoluta.

3.3.1. Acumulação Relativa

As teorias relacionadas com a acumulação relativa referem-se à remoção de materiais relativamente solúveis provenientes da rocha primária originalmente rica em constituintes de ferro e alumínio. A decomposição química dos silicatos primários com a remoção de álcalis, terras alcalinas e sílica em solução deixa um material mais concentrado em ferro e alumínio. Esta concentração dá aos terrenos uma coloração de tijolo e, em geral, um concrecionamento das respectivas partículas cuja intensidade e distribuição são muito variáveis. Nestas considerações é feita uma distinção entre as acumulações aluminosas e ferruginosas.

Concentrações Aluminosas: verifica-se que a alteração da rocha ígnea primária produz uma gipsita bem cristalizada em alguns lugares. Os cristais formam um esqueleto coerente e fazem surgir diretamente uma crosta dura aluminosa.

Concentrações Ferruginosas: estas envolvem o enriquecimento do solo em ferro pela lavagem de sílica e bases combinadas bem como de outros materiais relativamente móveis dentro do solo. Desde que o ferro é menos solúvel, nas condições em que se encontra no campo, do que as bases, a remoção do ferro em solução não será possível a menos que as condições de mobilização e transporte estejam presentes simultaneamente (31).

As diferentes formas de ferro nos solos não são todas favoráveis ao seu desenvolvimento:

- a) O íon férrico é quase insolúvel no pH do solo;
- b) O íon ferroso é relativamente solúvel, mas estável somente no meio redutor;
- c) O ferro em sua forma coloidal pode ser deslocado, pois é muito sensível à eletrólise;
- d) O ferro se agrega vigorosamente à argila e pode ser lavado com ela devido à sua mudança eletrolítica

tica;

- e) Os íons férrico e ferroso são capazes de se associarem com certas substâncias que passam através dos solos dando íons complexos eletronegativos que não se agregam a argila e são menos sensíveis à eletrólitos;
- f) A migração de ferro na forma de carbonatos ocorre sob certas condições.

Geralmente sob condições de baixo pH e alto Eh, a mobilização de ferro em solução é reduzida e é assim concentrada no perfil residual.

3.3.2. Acumulação absoluta

Este processo envolve a remoção do ferro em solução, migração desta solução e a subsequente fixação do ferro no solo latéutico.

Para a remoção e mobilidade do ferro as condições devem ser favoráveis. Norton (37) usou a conhecida técnica de Garrels e Crist (33) na construção dos diagramas Eh - pH para estudar a mobilidade relativa do ferro sob condições variáveis de pH. Ele concluiu que a remoção seletiva do solo de álcalis, terras alcalinas e sílica é conseguida por uma combinação de Eh - pH onde a solubilidade de alumina, óxidos de metais polivalente e hidróxidos, é menor do que a do quartzo. Contudo, a remoção seletiva do ferro do solo com retenção de alumina requer unicamente condições específicas de Eh e pH. pH muito baixo mobilizará alumina e a um Eh alto o ferro residual é enriquecido.

Valeton (39) em 1972, descreveu o trabalho de Schelman, Feitnacht e Machaeli que estudam a solubilidade dos íons ferrosos (Fe^{2+} , Fe^{3+}) sob condições variáveis de Eh, pH, temperatura e idade. Feitnacht e Michaeli estudaram os efeitos da adição de uma base a uma solução com deficiência de prótons que con

tinha $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$. Soluções metaestáveis contendo ions $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5^{3+}$ $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5^{2+}$ $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_8\text{OH}^{4+}$ e $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4\text{OH}^+$ foram formadas e α FeO OH (goethite) cristalizada lentamente da solução. Imediatamente após a adição da base, amorfos coloidais $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e cristalino $\text{FeO}(\text{OH})$ são formados. Com a contínua adição da base, amorfos coloidais $\text{Fe}(\text{OH})_3$ aumentaram e posteriormente precipitaram. Este precipitado "envelheceu" para produzir uma quantidade relativamente pequena do cristalino Fe_2O_3 (hematita) e FeO OH (lepidocrocita).

Outras investigações têm também mostrado que a dissolução do hidróxido "envelhecido" dá origem à cristalização da goethita da solução.

Muitas propriedades físico-químicas observadas nas lateritas têm sido explicadas como devidas a vários estágios de oxidação e hidratação dos constituintes ferrosos e das relativas quantidades destes. Alexandre e Cady (23) acentuaram a importância de amorfos ou micro-cristalinos hidratados de ferro na produção de horizontes endurecidos nos perfis lateríticos. Estes colóides têm grandes áreas específicas e podem caminhar na solução mais facilmente do que minerais bem cristalizados. Eles também são muito livres e podem se mover como solos ou gelatinas para locais onde eles desenvolvem a estrutura cristalina sob condições de molhagem e secagem.

Hamilton (40) estudou o enriquecimento de perfis em alumínio e ferro através da migração com a produção da laterita. Ele também mencionou o trabalho dos óxidos coloidais de ferro, os quais são livres e movem rapidamente na solução. Estes podem mover-se de áreas elevadas para encostas e áreas baixas onde elas penetram para o depósito coloidal. Floculação, "envelhecimento", cristalização de hidróxido de ferro coloidal produzem um perfil laterítico conhecido como uma laterita de baixa superfície.

3.4. Classificação

Um sistema de classificação tem como ponto de partida, geralmente um conjunto de informações, que permite o conhecimento de algumas propriedades de um solo, as quais são utilizadas comparativamente quando se tenta discernir as propriedades e características de um solo desconhecido, do qual se conhecem apenas algumas propriedades que se julgam semelhantes às do solo conhecido (41).

Na natureza, os solos são tão diversos que é praticamente impossível ajustá-los dentro de categorias rígidas de tal maneira que se possa deduzir suas propriedades de engenharia em potencial. O problema de falta de compreensão das propriedades particulares do solo que se deseja medir, é acrescido pela falta de uma técnica que possa incorporar quantitativamente os fatores mineralógicos, químicos e ambientais de um sistema, levando em consideração a transformação sofrida pelo solo, quando em seu ambiente de convívio.

Como se sabe, a quase totalidade dos métodos empregados para classificação de solos estão estribados, geralmente, na distribuição do tamanho das partículas e determinação dos limites de liquidez e plasticidade do solo. Com base no conhecimento destas propriedades diversas outras características de engenharia podem ser deduzíveis de uma informação disponível sobre outros solos de propriedades e classificação semelhantes (42).

Ao que parece a simples adoção destes métodos com a finalidade de classificação de solos lateríticos, apesar do êxito do uso deste sistema de classificação por mais de quarenta anos, não têm apresentado bons resultados, tendo em vista que o comportamento do solo no campo não depende unicamente da distribuição do tamanho das partículas e da plasticidade. Certos fatores tais como gênese, história geológica, características morfológicas, tipo de mineralogia da argila, natureza dos íons trocáveis, e reais condições de umidade influenciam e aumentam a importância técnica dos sistemas de classificação existentes (12). Numerosos defeitos de pa

vimentos de estradas e aeroportos, construídos com ou sobre solos lateríticos, apesar da estrita adoção das especificações de granulometria e plasticidade, confirmaram a inaplicabilidade do atual sistema da classificação de zonas temperadas. A adoção da distribuição granulométrica e plasticidade, unicamente, para classificação de solos lateríticos, não obteve sucesso, ao que tudo indica, pelas seguintes razões (42):

1. Os testes de classificação não dão resultados reproduzíveis, porque são influenciados consideravelmente pelos métodos de preparação e manuseio do material;
2. Desde que o material seja um produto em de composição, ele pode conter materiais com diferentes graus de meteorização; assim estes testes não seriam adequados para a predição de propriedades de engenharia sem alguma definição do grau de meteorização (ou laterização);
3. As propriedades de engenharia e comportamento no campo dos solos lateríticos são influenciadas consideravelmente tanto pelo conteúdo químico e mineralógico como também pela gênese morfológica e meio ambiente.

É evidente a necessidade existente de uma classificação para solos lateríticos que leve em consideração o fato de que o material é um material de decomposição (ou laterizado) com diferentes graus de intemperismo (ou laterização) e diferentes conteúdos químicos e mineralógicos formados em ambientes diferentes.

Tal sistema de classificação deveria envolver o uso de testes simples, que forneçam resultados reproduzíveis e estabelecimento de métodos padronizados que fossem adotados universalmente.

Vários sistemas de classificação foram desenvolvidos para os materiais lateríticos. Contudo, a quase totalidade destes sistemas são geralmente baseados em fatores mineralógicos, ou de

agricultura; não são sistemas de classificação de engenharia e daí não serem bem apropriados e aceitáveis para fins de engenharia.

O grande problema encontrado no estudo dos solos lateríticos é a dificuldade de desenvolver uma definição ou sistema de classificação aceitável pelos químicos e geólogos, como também pelos cientistas de solos, e que tenha uma aplicação prática na geotécnica rodoviária, que é, sem dúvida, o campo de maior aplicação deste material de construção.

Diferentes métodos de classificação de solos lateríticos foram propostos por diversos investigadores, podendo-se sumariar nas seguintes categorias ou sistemas propostos:

1. Classificação baseada na Pedologia;
2. Classificação baseada na Topografia;
3. Classificação baseada na Geologia e Material-mãe;
4. Classificação baseada na Composição Química e Mineralógica;
5. Classificação baseada no Clima/Vegetação.

Pendleton (43), levando em consideração o grau de adiantamento do processo de laterização e morfologia, classifica como solo de laterita todo aquele em que a laterita ou horizonte endurecido se encontra bem individualizado e solo laterítico aquele que apresenta uma laterização incipiente. Da mesma forma, Chevalier - refere Novais Ferreira (7) - propõe as designações de lateritas jovens, adultos e senis. Ele se refere a aluviões lateríticos e lateritas fósseis. Outros apóiam a classificação no processo de formação ou condições de ocorrência como Fox (20), que indica dois tipos: as lateritas primárias, (de "high-level" ou "in situ") e as lateritas secundárias (de "low-level", detríticas ou de Buchanan).

Levando em consideração a composição química, Martin e Doyne (13) classificam as lateritas segundo a relação molecular sílica/alumina (Ki). Assim, tem-se:

Solo de Laterita Ki menor ou igual a 2

| | |
|---------------------|-----------------------|
| Solo laterítico | Ki entre 1,33 e 2 |
| Solo não laterítico | Ki maior ou igual a 2 |

Esta classificação foi bastante criticada pelos vários estudiosos do assunto, em virtude de levar em consideração unicamente os sesquióxidos de alumínio, deixando de fora os sesquióxidos de ferro e outros.

Lacroix (11) designa por elementos lateríticos os hidróxidos de alumínio, de ferro, de titânio e de manganês, e propõe a seguinte classificação:

Laterita propriamente dita - 90 a 100% de elementos lateríticos;

Laterita argilosa - 50 a 90% de elementos lateríticos;

Caulin e argila laterítica - 10 a 50% de elementos lateríticos.

Winterkorn (14), baseado na relação sílica/sesquióxidos de ferro e alumínio, usa a mesma classificação proposta por Martin e Doyne (13) em 1927 para distinguir os solos de laterita, os solos lateríticos e solos não lateríticos.

Correia Antunes e Teixeira (16) também tentaram uma classificação baseada nos conteúdos de alumina, sílica e ferro em frações de tamanhos diversos do material, complementado por Difração de Raios-X, Análise Termo-Diferencial e Análise Termo-Gravimétrica. Marin e Parry, segundo Arulanandan (44), sugerem o uso da mineralogia como uma base para a classificação das lateritas. Por outro lado, uma classificação baseada na topografia, profundidade da amostra e posição de lençol freático, tem sido advogado por Rudock (45), sem levar em consideração as propriedades mineralógicas ou químicas.

Little (2), na sétima Conferência Internacional de Mecânica dos solos em 1.969, sugeriu a adoção de uma classificação de engenharia para os solos residuais tropicais, fundamentado no trabalho de Moye, baseado nas características morfológicas numa es

timativa do grau de meteorização da rocha-mãe. Dividindo em cinco partes o grau de decomposição entre a rocha fresca e a rocha completamente decomposta, ele define cinco graduações de sanidade da rocha, reservando o grau I para a rocha sã. (Ver tabela 3.1).

Por outro lado, têm alguns autores insistido no uso da granulometria e plasticidade para classificação dos solos lateríticos. Vantil e Rananand (46), levando em consideração que os sistemas de classificação são geralmente baseados em fatores mineralógicos ou de agricultura, argumentam que não são apropriados para aplicação em obras de engenharia. Eles consideram a plasticidade como um indicador seguro de qualidade e sugerem uma extensão do sistema de Classificação Unificada (Unified Classification System), separando as características de durabilidade do material laterítico, pela adição de um símbolo numérico indicador: "(1)" alta durabilidade, "(2)" média durabilidade e "(3)" baixa durabilidade - a durabilidade sendo definida neste caso pelos ensaios, "California Coorse (Dc) e Fine Durability" (DE), com seguinte critério:

| Símbolo | Classificação Dc e Df |
|---------|-----------------------|
| (1) | < 35 |
| (2) | 20 - 35 |
| (3) | < 20 |

Atlant (47) tentou usar métodos dos "Laboratoires des Ponts et Chaussées" (L.P.C.), com uma extensão que considera as características de geologia e pedologia para os materiais da Costa de Marfim. Ele apresenta um sistema de classificação com base nas seguintes características:

1. Geotécnica: o solo deve ser classificado segundo a classificação L.P.C., em função de sua granulometria;
2. Geológica: definir a rocha-mãe;
3. Pedológica: precisar o lugar pela amostra no perfil tipo A, B ou C. Precisar a natureza da alteração (ferralítica ou ferruginosa), das superfícies da camada endureci

Solo Tropical Residual

| GRAU DE DECOMPOSIÇÃO | D e s c r i ç ã o | GRAU |
|-----------------------------|--|------|
| Solo | Camada superficial contendo húmos e raízes. Textura rochosa não identificável. <u>I</u> nstável em taludes, quando a vegetação de <u>c</u> obertura é destruída. | VI |
| Decompоста Completamente | Rocha completamente decomposta pela ação do tempo no local, mas com textura ainda identificável; em tipos de origem graníti <u>c</u> as feldespato completamente decomposto com argilas minerais. Testemunhos não <u>p</u> odem ser retirados pelos métodos ordinários de perfuração. Pode ser cavado manualmente. | V |
| Altamente Decompоста | Rocha tão enfraquecida pela ação do tempo que pedaços de razoáveis tamanhos podem ser quebrados e fragmentados com as mãos. Algumas vezes, pode-se conseguir testemu <u>n</u> hos utilizando-se cuidadosamente a <u>p</u> erfuração rotativa. Manchada pela limonita. | IV |
| Moderamente Decompоста | Consideravelmente desgastada pelo tempo. Possuindo algumas resistências; pedaços grandes (isto é testemunho <u>N</u> x) não podem ser quebrados com as mãos. Frequentemente manchado pela limonita. Difícil de ser <u>e</u> s cavada sem o uso de explosivos. | III |
| Fracamente Decompоста | Desgastada nitidamente com fragmentos man <u>ch</u> ados pela limonita. Alguns granitos e feldespato decompostos. Resistência próxi <u>m</u> a àquela da rocha viva. É necessário usar explosivos para escavação. | II |
| Rocha Sã | A rocha sã pode ter algumas juntas man <u>ch</u> adas pela limonita imediatamente abaixo da rocha decomposta. | I |

Tabela 3.1.

da ou não (tache, ronille, carapace), ta
chetée, bariolée.

Segundo Atlant, pode-se definir uma amostra de solo laterítico através de cinco qualificações:

- a) Sua classificação L.P.C
- b) Natureza da rocha-mãe
- c) Natureza da alteração
- d) Nível do horizonte de retirada da amostra (A, B ou C)
- e) As superfícies da camada caracterizada por um ou vários adjetivos seguintes: Típico, modal, endurecido, empobrecido, remanil.

Arulanandan (44) refere que Arulanandan e Mitchell têm tentado o uso de métodos elétricos para estudar as estruturas de sistemas de argila-água-eletrólito nos últimos anos. Em tal estudo foram examinadas as características de dispersão elétrica na amplitude de baixa frequência (50 a 10^5 ciclos por segundo) em relação a estrutura de determinadas características, como orientação de partículas, tamanho de partículas, quantidade de eletrólito, temperatura e densidade de carga superficial.

Eles verificaram que solos testados eletricamente fornecem uma relação entre os fatores de composição e fatores ambientais e assim, os parâmetros medidos diretamente na amplitude de baixa frequência e os parâmetros obtidos em modelos heterogêneos na amplitude de frequência de rádio parecem fornecer uma classificação de solos fundamental e quantitativa, que leva em conta tanto os fatores ambientais como os de composição. Concluem os autores do trabalho, levando em consideração a sua natureza fundamental e o fato de que é baseado tanto na composição como no meio ambiente, que o sistema de classificação deverá ser capaz de prever as propriedades tecnológicas do solo, e recomenda, a sua aplicação também aos solos lateríticos.

Os pedologistas e outros cientistas de solos têm

abordado o problema da classificação das lateritas procurando estabelecer um sistema baseado naqueles de solos tropicais.

Basicamente existem dois tipos de abordagem (48):

- a) Abordagem sintética: esta envolve a consideração de fatores genéticos, processo de genética dos solos e propriedades de fatores pedogenéticos;
- b) Abordagem analítica: baseada no comportamento morfológico das lateritas, dando lugar a considerações de genética do solo.

Como se pode verificar, existe uma tendência quase generalizada para a formação de grupos de trabalho de países em particular, cada um seguindo um modelo de classificação isolado. Desta maneira, vários sistemas são usados por diversos países, baseados nos vários critérios existentes, conforme veremos a seguir (48):

União Soviética (U.R.S.S.). A classificação de solos lateríticos neste sistema é baseado em fatores genéticos e uma distinção é feita entre laterita e solos lateríticos. Este sistema utiliza temperatura, fatores de erosão e formação de solos para estabelecer uma distinção entre lateritas tropicais e solos lateríticos sub-tropicais. Sendo quantitativo, ele relata somente o que se refere à extensão do desenvolvimento do processo e às espessuras dos produtos formados, representando, portanto, dois perfis finais com gradação completa entre eles.

Consideração também é dada à umidade e índice de umidade. Solos de regiões tropicais permanentemente úmidas até regiões sub-tropicais poderiam ser extra-lateritas, solos lateríticos, ou alites, enquanto os de regiões menos úmidas podiam ser lateritas mistas, solos lateríticos típicos ou solos lateríticos que são alito-ferrites e ferrito-alites.

O sistema igualmente considera o efeito da geologia nos solos desenvolvidos. Solos desenvolvidos sobre rochas básicas geralmente ricos em minerais recém-formados (alofanes) e são, portanto, chamados alofanitas. Subdividem-se:

- a) Alofanitas húmicas das regiões tropicais áridas ou semi-áridas;
- b) Alofanitas laterizadas própria das regiões tropicais úmidas e semi-úmidas (31).

Sistema Francês. Este usa o termo ferralítico para os solos não endurecidos sobre aqueles sem um horizonte endurecido. O sistema distingue alterações lateríticas em solos ferralíticos e processos que conduzem ao endurecimento de solos. Considera que o endurecimento pode ocorrer em solos geralmente e considerações sobre endurecimento não entram na classificação senão no nível inferior.

Solos ferralíticos são definidos como aqueles que têm as seguintes características:

- a) Baixo conteúdo de minerais primários;
- b) Alto conteúdo de óxido metálico que resulta numa baixa razão de sílica-sesquióxidos (razão < 2) nas frações coloidais e no solo como um todo, com a remoção de quartzo primário; deve conter alumina separada no mínimo em um dos horizontes;
- c) A fração de silte deve ser desprezível.

Os solos ferralíticos são diferenciados dentro de quatro categorias especiais:

1. Solos levemente ferralíticos: composição mineral não completamente desenvolvida. Têm um conteúdo de mineral primário significativo e a razão K_i cerca de 2 usualmente exibe textura pseudo-prismática. Os sub-grupos incluem:

- a) ferrisolico
- b) pseudo-gley hidromórfico
- c) modal
- d) endurecido

2. Solos ferralíticos típicos: exibem uma estrutura característica poliédrica. Consideram níveis inferiores com base na cor, textura, etc.
3. Solos ferralíticos lavados: estes não têm mineral primário e são fortemente lavados. A principal consideração se refere à extensão do tipo de lavagem. Podem ser divididos nos seguintes sub-grupos:
 - a) Solos lavados de base na superfície, mas que contêm uma quantidade apreciável de colóides minerais;
 - b) Solos lavados de base sesquióxidos e argila;
 - c) Solos lavados com horizontes endurecidos.
4. Solos ferralíticos húmicos: caracterizados por um alto conteúdo de matéria orgânica. A subdivisão é feita com base na coloração acidez ou alcalinidade do horizonte húmico. Existem cinco sub-grupos:
 - a) Solos negros
 - b) Solos vermelho-marron
 - c) Solos marrons
 - d) Solos ácidos, muitas vezes com a textura horizonte B
 - e) Solos de grandes altitudes.

Solos com horizontes de crostas são considerados sob a denominação de solos ferruginosos tropicais e são divididos em sub-grupos de acordo com a taxa de acumulação de ferro, em profundidade, em relação com o processo de bloqueamento devido à aluviação da argila. Quatro são os sub-grupos de solos ferruginosos lava

dos dependendo da presença ou ausência de concreções crostas e pseudo-gley em profundidade (4).

Sistema Português. Este considera o uso do termo ferralítico e faz a diferença entre:

1. Solos ferralíticos tropicais: com ou sem horizontes endurecidos (laterita) que podem ser subdivididos com base na coloração;
2. Solos para ferralíticos: o próprio solo ferralítico, usualmente com um horizonte B estrutural e contendo agregados de superfície brilhante; a sub-divisão é baseada na Topografia local;
3. Solos ferralíticos com ou sem horizontes endurecidos: também subdivididos considerando-se o tipo e a profundidade da coloração.

Sistema Inglês. O sistema faz a diferença entre latreitas e solos lateríticos. Os solos lateríticos se aproximam do latosolo de Kellogg (18) e as lateritas são definidas no sentido de Pendleton, isto é, aquele no qual se encontra um horizonte endurecido no perfil. Contudo, este horizonte pode ser incipiente ou desenvolvido imaturamente.

As características das lateritas não endurecidas são determinadas em parte pelo clima e em parte pela vegetação. A sub-divisão desta é baseada no grau de acidez dos diferentes horizontes.

Sistema Australiano. São considerados solos ácidos a neutros com pouco carbonato. Eles são de origem polimórfica.

Krasnozems: vermelha a marron amarelada, material friável argiloso e profundo com horizonte pouco desenvolvido;

Laterite Krasnozenes: tem um horizonte endurecido de espessura variável que

pode ser rochoso e pisolítico, fragmentar ou difuso ou poroso verniculado. O horizonte endurecido localmente repousa num horizonte caulinitico esbranquiçado ou matizado.

Terras vermelhas lateríticas: são vermelhas escuras a solos avermelhados com horizontes de lateritas em profundidade. A diferenciação dos horizontes é geralmente apreciada. Os horizontes endurecidos são de espessura e natureza variada. Podem ser modular, pisolítico, vernicular ou rochoso.

Sistema Americano (E.E.U.U.). Comumente mais conhecido como U.S.D.A. 7.^a Aproximação. Estes solos são classificados como óxidos. Uma das duas seguintes condições deve ser encontrada: horizonte óxido ou 30cm de superfície de plintita formando uma fase contínua e não endurecida.

As características dos horizontes óxidos são assim definidas:

1. Poliédrica ou de bloco com numerosos blocos visíveis;
2. Pouco ou nenhuma parte da estrutura original do material-mãe;
3. 15% ou menos de partículas do tamanho da argila (menor que 2μ) dos quais 90% consistem de uma mistura pobre e desigual de sesquióxidos livre e argila do tipo 1:1;
4. Não menos de 12% de uma razão 1:1 de sesquióxidos livres e argilas;
5. 1% ou menos de minerais primários na fração de areia/silte. As frações de argila

não devem mostrar quaisquer traços de montmorilonita, alita alofane ou vermiculita;

6. A capacidade de troca catiônica menor do que 20 m.e.-q./100g da fração tamanho argila (método de acetato de amônia).

Plintita:

Mistura altamente alterada vermelha variegada de argila quartzo e outras composições. É rica em sesquióxidos e pobre em húmus. Universalmente folheada poligonal reticulada, formada por repetidas lavagens e secagens. Pode também consistir de resíduos soltos endurecidos matizados de vermelhos. As bandas são difusas e graduais ou abruptas. A formação da plintita produz concreções isoladas ou caldeirões duros escoriáceas em crostas como um resultado do endurecimento diferencial. É o mais rico em hematita.

Os óxidos de ferro podem ser divididos em:

Aquox

Acrox

Ostox

Idox

Os perfis endurecidos podem ser Alfissolos e Ultissolos. Ambos não têm horizontes óxidos.

Os ultissolos são fortemente dessaturados de base. Os alfissolos têm uma saturação de base do horizonte B.

Sistema Belga. Os materiais lateríticos são principalmente classificados como caulissolos. A discriminação é baseada nas principais diferenças do tipo de alteração, natureza e desenvolvimento dos horizontes no perfil.

Os caulissolos são classificados em:

- a) Higro-caulissolos: caulissolo de florestas tropicais de baixa altitude;
- b) Higro-xenocaulissolos: têm caulissolo de savana de saturação de base;
- c) Xenocaulissolos: são caulissolos de savanas secas com altas saturações de base;
- d) Horizontais húmicos: caulissolos do cinturão da montanha;
- e) Hidro-caulissolo: caulissolos hidro-mórficos.

Sistema Brasileiro: O estudo sistemático de solos lateríticos no Brasil foi iniciado em 1959, com a realização do Congresso Mundial de Estradas, no Rio de Janeiro. Este Congresso despertou real interesse, especialmente no meio rodoviário nacional. Os solos lateríticos são conhecidos no Brasil, dependendo da região onde se encontram, pelos nomes de "tapiocanga", "canga", "mocaroro", "recifes", "piçarras", "tauá" etc.

Vários pesquisadores brasileiros, notadamente Medina (49), Gontijo (50) e Souza (51) assinalaram a importância das condições climáticas como elemento preponderante nos processos de laterização. Por outro lado, Pimenta (52) propõe classificar as lateritas nos seguintes grupos:

- a) Lateritas argilosas ou siltosas: são aquelas constituídas de elementos finos. Elas existem em camadas isoladas, principalmente abaixo das camadas de outros tipos de lateritas, constituindo, ao que tudo indica, um sistema de laterização, em marcha evolutiva.
- b) Lateritas pisolíticas: são concreções ou pisolitos com aspecto de escória misturada a uma parte fina argilosa ou siltosa de cor variável do vermelho ao amarelo. A natureza desses pisolitos é variável, notan

do-se que os mais superficiais são mais duros e, à medida que a camada vai se aprofundando, eles vão-se tornando mais fracos e desagregáveis pela simples lavagem ou mesmo quando apertados entre os dedos.

- c) Lateritas rochosas: são as formadas por um desenvolvimento contínuo com o aspecto de uma verdadeira rocha. Também nas rochas se observa que a parte superior é mais dura e que esta dureza diminui com a profundidade.

Os esforços isolados dos pesquisadores brasileiros foram finalmente concretizados com a adoção oficial, nos meios rodoviários (4), de uma classificação de solos lateríticos. Esta classificação está baseada nos seguintes critérios:

- a) Relação sílica/sesquióxidos da fração coloidal (abaixo de 2 micros) menor que 2;
- b) Expansão inferior a 0,2% medido no ensaio de I.S.C., DNER-ME 49-74, com 26 ou 56 golpes por camada.

3.4.1. Comentário crítico dos sistemas de classificação descritos e apresentação de sistemas de aplicação prática potencial na engenharia.

Todos os sistemas de classificação descritos anteriormente têm uma aplicação muito limitada no campo da engenharia, principalmente porque os agrupamentos que formam a estrutura de qualquer classificação, são baseados em critérios predominantemente qualitativos, e, mais importante ainda, porque os grupos apresentados nas classificações não são relacionados com propriedades quantitativas de comportamento de engenharia. O engenheiro necessita não somente reconhecer um solo vermelho com objetivo de fixar um nome, mas associar este nome a parâmetros quantitativos de relevância para sua utilização numa estrutura.

Uma indicação clara das limitações e pouca aplicabi

lidade prática dos sistemas de classificação é o grande número de diversificações existente. Cientistas e pesquisadores, reconhecendo este fato, iniciaram estudos para tentar estabelecer uma classificação única que poderia ser usada nos novos Mapas de solos do mundo. Reuniões de pesquisadores representando os vários sistemas de classificação foram iniciadas em 1961 sob os auspícios da FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations) e da UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). O resultado foi uma classificação de "Compromisso" cuja validade ainda não é clara.

É opinião do autor que o limitado sucesso e aplicabilidade dos sistemas de classificação é devido sobretudo à impossibilidade de definir os grupos com características bem diferenciadas. Os problemas para isto são principalmente:

- a) A heterogeneidade dos processos através dos quais as lateritas podem ser formadas, como também os materiais resultantes. Tem sido mostrado por alguns autores - entre eles, Hamilton (40) e Alexandre e Cady (23) - que existe mais de um modo de formação de um horizonte rico em sesquióxidos com deficiência de bases. Igualmente, há uma realidade que a única relação entre lateritas de muitas regiões diferentes é o processo de acumulação. A composição química e mineralógica, como também as propriedades físicas, variam entre limites amplos e as tendências da continuidade destas propriedades estão significativamente ausentes.
- b) Ainda existe um grande vazio com relação ao conhecimento e complementação dos processos de formação, endurecimento e propriedades de engenharia, bem como de outras propriedades físicas e físico-químicas.

- c) Estudos detalhados quantitativos das propriedades de engenharia destes solos são muito escassos. Por isso, no momento parece difícil tentar uma classificação onde os grupos tenham uma descrição e propriedades bem definidas e determinadas.

Provavelmente a classificação de solos lateríticos que, no momento, parece de maior utilidade potencial no campo da engenharia, é a classificação da USAID, desenvolvida pelo Lyons Associates (28) durante o estudo das propriedades dos solos da África. Esta classificação utiliza uma simplificação da classificação de D'Hoore (53) e tenta correlações estatísticas de propriedades de engenharia com grupos da classificação de D'Hoore. Por sua importância estes grupos e suas propriedades são descritos a seguir:

Solos tropicais ferruginosos: Os solos tropicais ferruginosos têm, de um modo geral, perfis A, B, e C. Observa-se uma marcante separação de óxidos de ferro livre, que pode ser devido à lixiviação no perfil ou precipitação dentro do perfil na forma de manchas ou concreções. As reservas de minerais intemperizados são frequentemente apreciáveis. A relação silte/argila ($20\mu/2\mu$) determinada por dispersão repetida sedimentação e separação do fluente em suspensão é geralmente acima de 0,15. O argilo mineral predominante é na sua maioria caulinita, mas frequentemente contém pequenas quantidades de argila do tipo 1:2, sendo que a gipsita geralmente não é encontrada. A relação SiO_2/Al_2O_3 se situa próximo de 2 ou um pouco maior, enquanto que a relação SiO_2/R_2O_3 é sempre menor que 2. Estes solos têm uma baixa plasticidade e as densidades de compactação correspondentes ao ASSHO modificado são altas com elevados valores de C.B.R., maiores do que os outros dois grupos.

Solos ferralíticos: Os solos ferralíticos são frequentemente profundos e seus horizontes são apenas ligeiramente diferenciados. Contêm pouca ou nenhuma reserva de minerais intemperizados. A relação silte/argila determinada por dispersão repetida sedimentação e separação do fluente em suspensão é geralmente menor do que 0,25 nos horizontes B e C. Os argilos minerais são predomi

nantemente do tipo 1:1 e são na sua maioria associados com grandes quantidades de minerais ferrosos, embora elas sejam geralmente associadas com minerais hidratados de alumina; gipsita, que é uma das suas formas cristalizadas, não é um constituinte essencial, ainda que esteja frequentemente presente. A relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ se encontra algumas vezes próximo a 2, sendo usualmente menor que 2. Os solos ferralíticos são semelhantes, até certo ponto, aos ferrissolos, apresentando alta plasticidade e valores de C.B.R. mais baixos do que os solos ferruginosos.

Ferrissolos: Os ferrissolos têm um perfil que se assemelha muito ao dos solos ferralíticos, frequentemente com um horizonte estrutural B e com agregados tendo superfícies polidas. Estas superfícies não são necessariamente devidas a revestimento de argila, mas podem ser em virtude da presença de misturas gelatinosas de alumina e sílica. A reserva de minerais intemperizados é geralmente baixa, mas pode exceder 10% das frações com 50 a 250 microns. A relação silte/argila ($20\mu/2\mu$), determinada por dispersão repetida, sedimentação e separação do fluente em suspensão, é geralmente superior a 0,20 acima das rochas ígneas e metamórficas. A fração argila consiste quase inteiramente de caulinita, óxidos de ferro livres e materiais amorfos algumas vezes com pequenas quantidades de argila do tipo 2:1 e gipsita. A relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ se aproxima de 2, porém na maioria das vezes é menor do que 2. Os ferrissolos diferem dos outros grupos de solos, porque as superfícies de erosão impedem um desenvolvimento normal do perfil e força o mesmo a se desenvolver em profundidade nos materiais matrizes menos intemperizados.

Outro trabalho de classificação que merece ser citado é aquele proveniente do estudo de solos do Brasil que foi levado a cabo conjuntamente pela Lyons Associates e o Departamento Nacional de Estradas de Rodagens com suporte da USAID. Este estudo é similar ao estudo dos solos da África com a diferença de que a classificação pedológica de D'Hoëre foi substituída pela classificação do "Compromisso" da FAO, - UNESCO mencionada anteriormente. Os resultados ainda não estão disponíveis para exame, no entanto crê-se que este estudo será de utilidade para os cientistas, não somente brasi

leiros, mas para todos aqueles interessados na busca de uma classi
ficação útil no campo da engenharia.

CAPÍTULO 4

FORMAÇÃO DOS SOLOS DO ESTADO DA PARAÍBA
E DESCRIÇÃO DE OCORRÊNCIAS ESTUDADAS.

4.1. Dados Gerais

4.1.1. Situação (54)

O Estado da Paraíba, com 56.372 Km^2 , se encontra localizado na porção oriental da Grande Região Nordeste do Brasil, situando-se entre os meridianos de $34^{\circ} 45' 54''$ e $38^{\circ} 45' 45''$ de longitude a oeste de Greenwich e os paralelos de $6^{\circ} 02' 12''$ e $8^{\circ} 19' 18''$ de latitude sul (veja figura 4.1).

Limita-se ao norte com o Estado do Rio Grande do Norte, ao sul com o Estado de Pernambuco, a leste com o Oceano Atlântico e a oeste com o Estado do Ceará.

O Conselho Nacional de Geografia dividiu o Estado da Paraíba em nove Zonas Fisiográficas a saber:

Litoral e Mata, Agreste e Caatinga Litorânea, Sertão Alto, Sertão do Piranhas e Sertão do Oeste. (Veja Figura 4.2).

Por outro lado, o Departamento de Geografia da Universidade Federal da Paraíba adota a divisão do Estado nas seguintes regiões geográficas:



Figura 4.1. Mapa do Brasil mostrando a localização do Estado da Paraíba.

ZONAS FISIográficas DA PARAÍBA

— 1968 —

ESCALA GRÁFICA

50 0 50 100
km

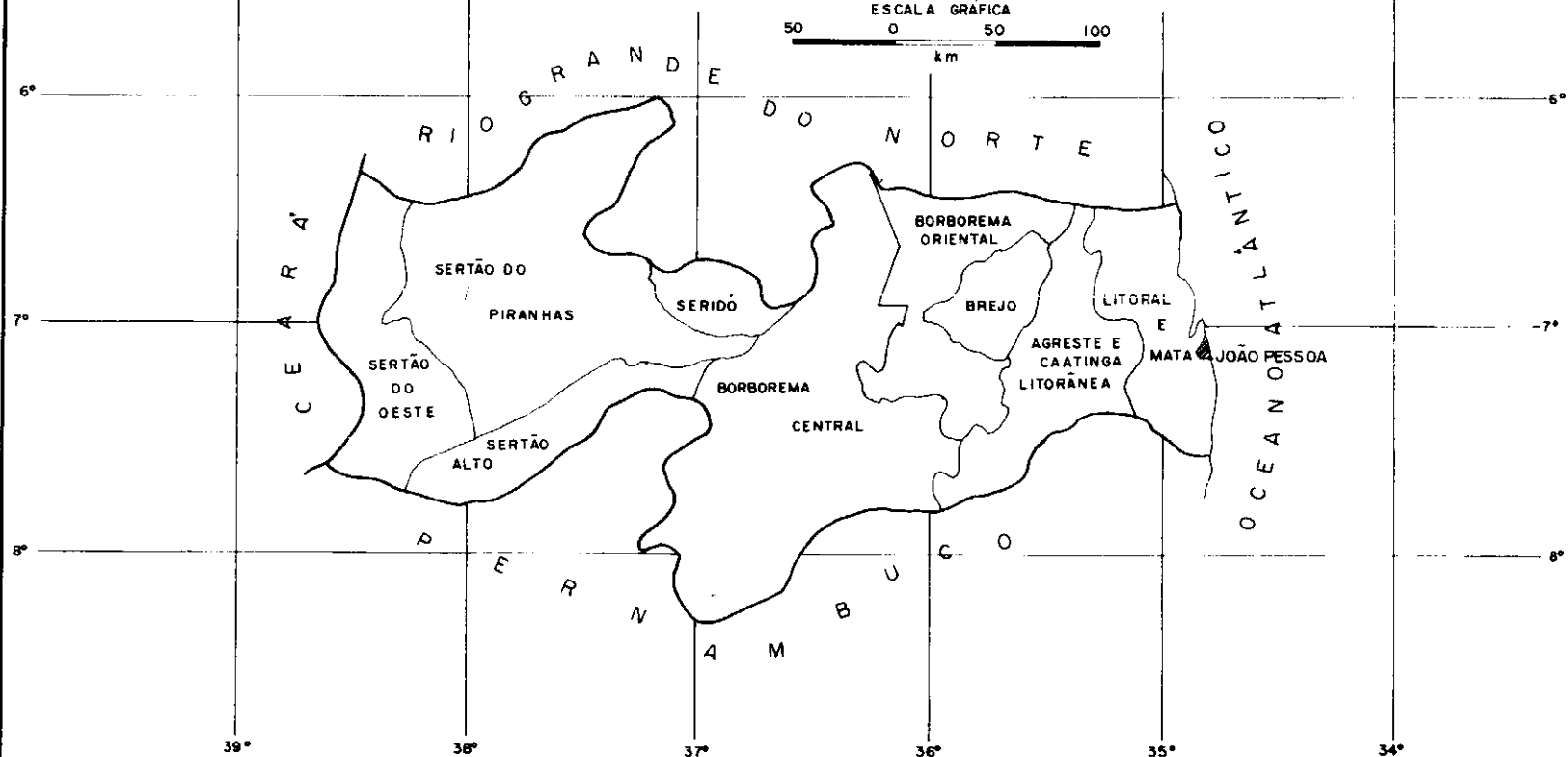


Figura 4.2. Divisão do Estado da Paraíba segundo o Conselho Nacional de Geografia.

1. Litoral: Praias, tabuleiros e várzeas;
2. Agreste Acatingado
3. Brejos Serranos: Brejo, Serras e agreste
4. Borborema: Curimataú, Carirís da Paraíba e Carirís de Princesa.
5. Sertão: sertão do seridó, baixo sertão do Piranhas e alto sertão.

4.1.2. Hidrologia e Relevo (54)

Compõem a rede hidrográfica da Paraíba quatro principais bacias: Bacia do Rio Piranhas, Bacia do Paraíba, Bacia do Curimataú e Bacia do Mamanguape. Estas bacias são mostradas na figura 4.3. Todos os rios são de regime temporário, permitindo na estação seca a utilização agrícola de seus leitos.

O relevo do Estado da Paraíba apresenta de um modo geral um aspecto bem diferenciado, podendo-se destacar as unidades morfológicas principais, conforme apresentado a seguir: (Veja figura 4.4).

1. Baixada Litorânea
2. Baixos Plantôs Costeiros (tabuleiros)
3. Depressão Subterrânea
4. Planalto da Borborema: Frentes do Planalto; Superfície do Planalto ou dos Cariris, Restos de capeamentos sedimentares elevados.
5. Depressão Sertaneja: Superfície de pediplanação com pequenos inselbergues, Bacia sedimentar cretácea.
6. Outras áreas cristalinas (inclui maços residuais e inselbergues).

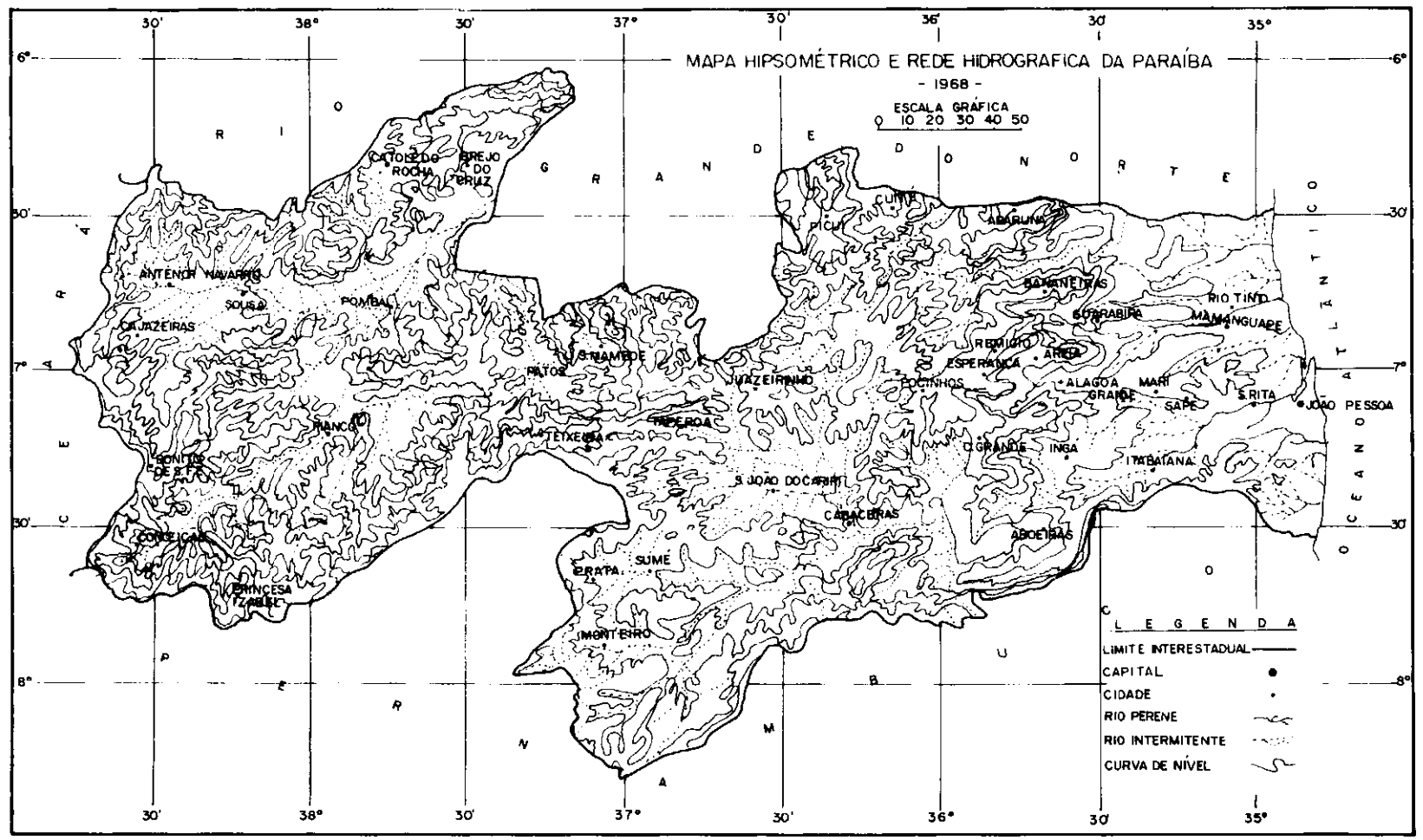


Figura 4.3. Hidrografia do Estado da Paraíba

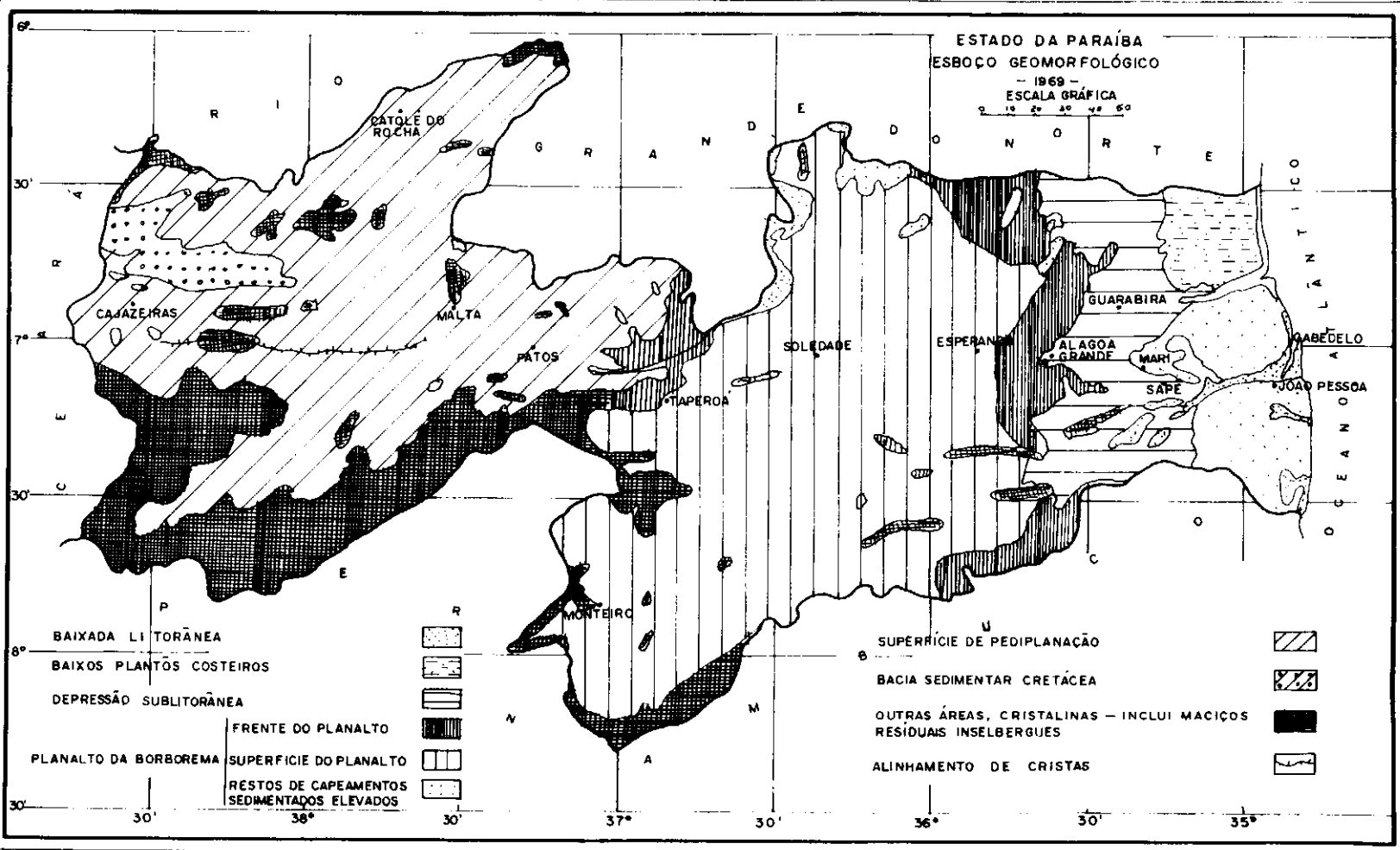


Figura 4.4. Relevo do Estado da Paraíba.

4.1.3. Geologia e Material Originário (54)

O Pré-Cambriano ocupa a maior parte do Estado da Paraíba, predominando de maneira mais acentuada sobre os terrenos sedimentares.

A Figura 4.5 mostra esquematicamente a geologia da Paraíba. Esta pode ser resumida da seguinte forma:

1. Holoceno: restingas e dunas, aluviões e Mangues.
2. Terciário: Grupo Barreiras (incluindo a formação Bananeiras) e série Serra dos Martins.
3. Cretáceo: Formações Itamaracá, Formações Gramame e série Rio do Peixe.
4. Pré-Cambriano (B)
5. Pré-Cambriano (CD).

4.1.4. Clima (54)

De conformidade com a classificação de Koppen, foram constatados os seguintes tipos e sub-tipos de clima na Paraíba: As', Bsh e Aw, sendo:

As' : quente e úmido com chuvas de outono-inverno; ocorre desde o litoral até atingir o planalto da Borborema em sua extensão aproximada de 100 Km, compreendendo as Zonas Fisiográficas do Litoral e Mata, Agreste e Caatinga Litorânea, Brejo e Borborema Oriental. Caracteriza-se em virtude de apresentar chuvas de outono e um período de estiagem de 5 a 6 meses.

As precipitações pluviais na zona do Litoral e Mata oscilam em torno de 1.500 mm, decrescendo rapidamente para o interior, atingindo na cidade de Sapé a média de 1.173 mm anuais. Por outro lado, na região do agreste e Caatinga Litorânea e em grande parte da Frente Oriental da Borborema, as precipitações pluviais

ESBOÇO GEOLOGICO DO ESTADO DA PARAIBA

- 1968 -

ESC. GRAFICA
Q 10 20 30 40 50

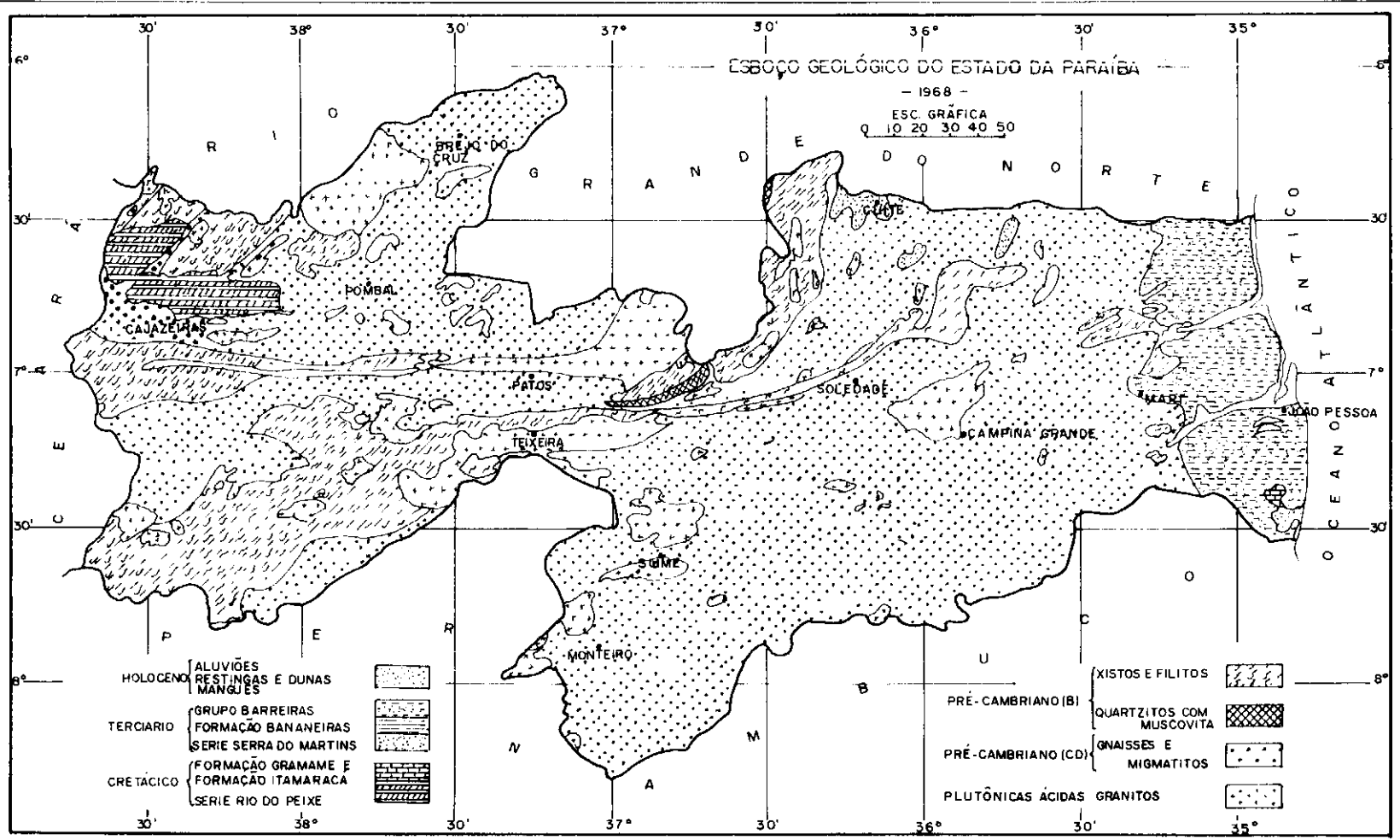


Figura 4.5. Geologia do Estado da Paraíba.

estão geralmente em torno de 700 mm. A parte central da encosta do planalto corresponde à zona do Brejo, em virtude de sua maior altitude, destaca-se por uma elevada pluviosidade, comparável à que ocorre no litoral.

A variação de temperatura é muito pequena durante o ano e as médias anuais estão compreendidas entre 22°C e 26°C.

A umidade relativa é bastante uniforme em toda a região, apresentando uma média de 80%.

Bsh : semi-árido quente. Este tipo climático ocorre em toda a superfície do planalto da Borborema desde a Zona do Brejo até o Sertão, compreendendo as Zonas Fisiográficas da Borborema Central, do Seridó, alcançando o trecho do Sertão do Piranhas, que corresponde a Depressão de Patos.

Esta faixa semi-árida entre o leste e o oeste Paraibano é a área mais seca de todo o Estado, com precipitações pluviométricas média em torno de 400mm.

As médias de temperatura nunca são inferiores a 24°C.

Aw' : quente e úmido com chuvas de verão-outono. Este clima ocorre na parte oeste do Estado, desde Patos até o Ceará, abrangendo as Zonas Fisiográficas do Sertão de Piranhas, Sertão do Oeste e Sertão Alto.

A figura 4.6. mostra as Regiões Climáticas do Estado da Paraíba.

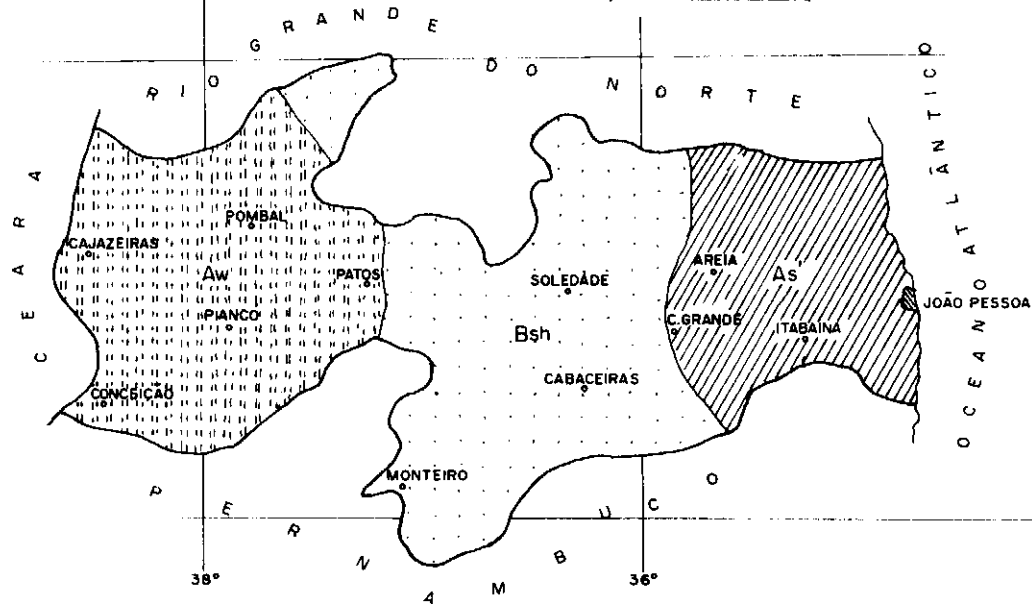
4.2. Jazidas Seleccionadas para Estudo

Antes do início da investigação, um extenso reconhecimento de campo efetuado no Estado da Paraíba revelou um total de 12 áreas de ocorrências de solos lateríticos, situadas em regiões geográficas diferentes, algumas das quais não estão registradas nos mapas de solos disponíveis no momento. Para o objetivo desta pesquisa foram seleccionadas três áreas onde a localização das jazidas se torna condizente com a utilização destes materiais para a construção

TIPOS DE CLIMA DA PARAÍBA (SEGUNDO KÖPPEN) — 1968 —

ESCALA GRÁFICA

50 0 50 100 km



TIPOS DE CLIMA —

As' — QUENTE E ÚMIDO COM CHUVAS DE OUTONO - INVERNO



Aw' — QUENTE E ÚMIDO COM CHUVAS DE VERÃO - OUTONO



Bsh — SEMI-ÁRIDO QUENTE



Figura 4.6. Regiões climáticas do Estado da Paraíba.

ção de estruturas de pavimentação e edificação de barragens de menor porte. A figura 4.7 mostra a posição geográfica das jazidas.

Este sub-capítulo, portanto, apresenta uma descrição geral da geologia, clima e topografia das três áreas, baseada na bibliografia publicada, e mais particularmente descreve em detalhe a formação das jazidas estudadas, com fundamento nas observações de campo, realizadas durante o reconhecimento e coleta. Posteriormente, as idéias sobre a origem e formação expostas neste capítulo são substantiadas com os dados quantitativos obtidos do trabalho de laboratório.

4.2.1. Jazida Sapé-Mari.

Esta jazida está situada na Zona Fisiográfica do Agreste e Caatinga Litorânea, mais precisamente à margem direita da Rodovia PB - 55, no trecho Mari-Guarabira, a aproximadamente 15 Km de Sapé.

A região é relativamente plana, possuindo uma altitude média de 125 m. A jazida ocorre do período terciário, tendo como unidade litológica sedimentos do grupo Barreiras. Este grupo, formado provavelmente no período terciário superior (plioceno), é constituído de sedimentos pouco consolidados, de estratificações predominantemente horizontais, apresentando sedimentos areno-argilosos, argilo-arenosos, arenosos e argilas de coloração variegada. O perfil do local onde foram coletadas as amostras, conforme mostrado na figura 4.8, consiste de uma camada superior formada por duras concreções ferruginosas, rica em seixos rolados de laterita endurecida. Subjacente às concreções, existe uma camada de argila rija, que diminui gradativamente de consistência com a profundidade e repousa sobre uma camada de argila arenosa mais mole.

A presença dos seixos rolados na camada superior da ocorrência revela que a mesma foi, provavelmente, formada por uma acumulação de materiais oriundos de níveis mais elevados, possivelmente de uma couraça lateritizada que se desagregou, e cimentação de depósito coluvionar. Por outro lado, a presença de um material mui

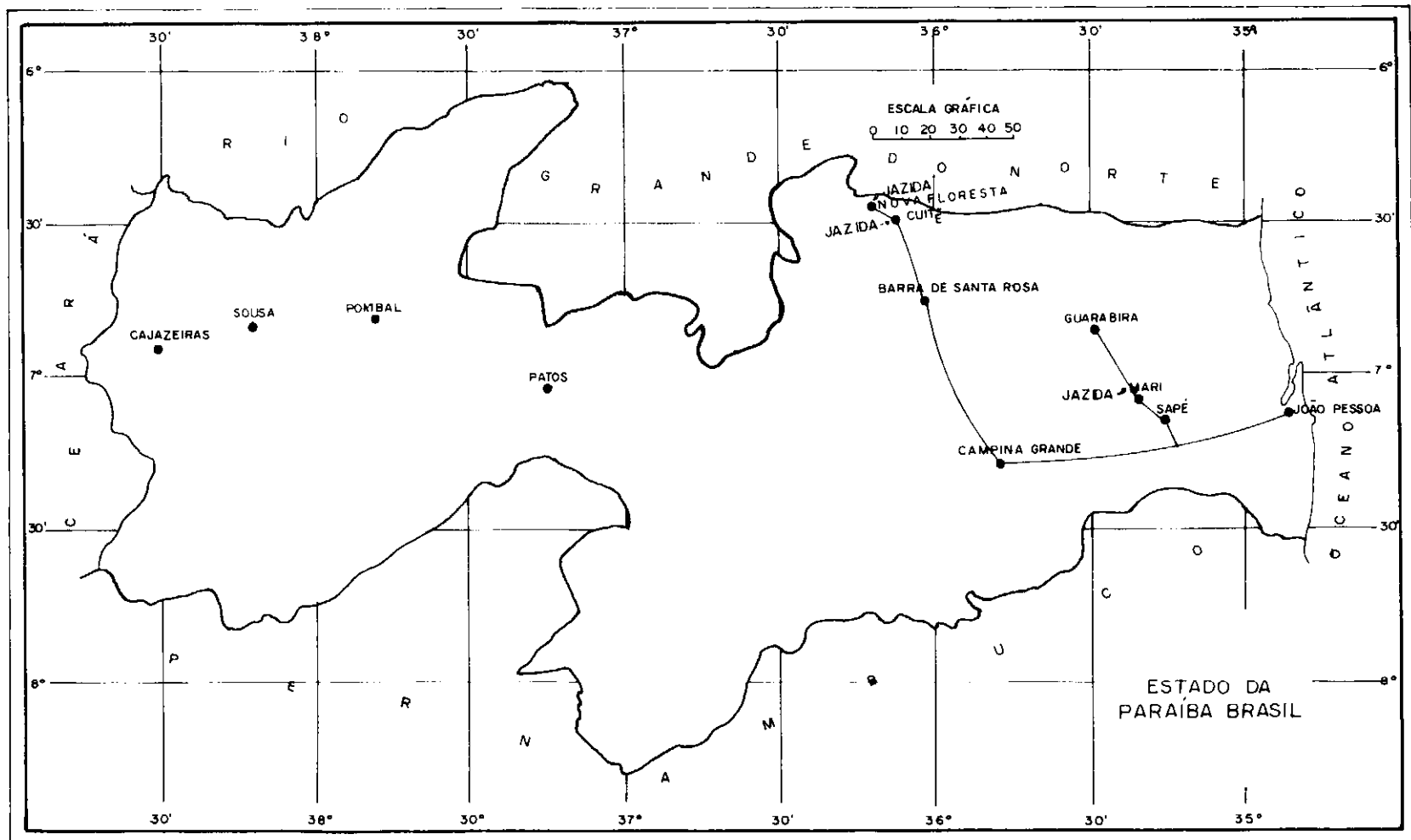
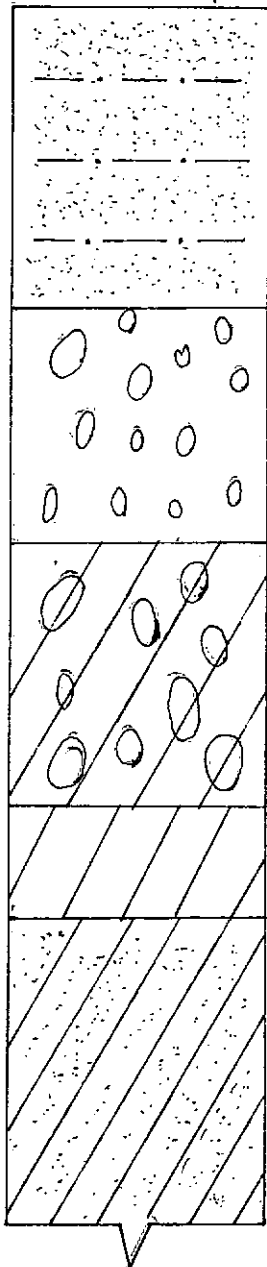


Figura 4.7. Posição geográfica das jazidas estudadas.

Figura 4.8. Perfil esquemático da jazida Sapê-Mari.



Solo muito fino (podsol)
Profundidade máxima de 1,40m com aproximadamente

Pequenas concreções lateríticas-pisólitos
Profundidade entre 60 e 80 cm.

Argila vermelha rija com concreções lateríticas
duras. Profundidade máxima de 1,00 m.

Argila vermelha mais solta
Profundidade entre 20 e 40 cm

Argila arenosa. Profundidade desconhecida, com
aproximadamente 20 cm descoberto.

to fino (podsol) na camada superficial, sem qualquer relação com o solo laterítico da camada que está por baixo, parece ser uma indicação de que esta camada (de solo laterítico), no passado geológico, esteve na superfície, o que vem confirmar a hipótese de transporte do material rolado. As concreções lateríticas endurecidas da camada de argila rija, dão uma idéia da oxidação e deposição do ferro carreado da camada superior e da couraça originária que parece ter existido nesta região. As camadas inferiores são produtos do complexo de meteorização da rocha originária ainda em processo de laterização. A hipótese da existência da couraça laterítica referida anteriormente se fundamenta na realidade de que, a 90 Km desta ocorrência, existem resíduos da mesma no município de Cuité, e mesmo em regiões mais próximas do litoral a couraça pode ser verificada abaixo do rigolito.

O clima da região não é uniforme durante o ano, apresentando uma variação de temperatura que oscila entre 34°C (média das máximas) e 16°C (média das mínimas) à sombra, tendo sido classificada segundo Koppen como sendo do tipo As' quente e úmido com chuvas de outono-inverno (54).

O pluviômetro instalado em local próximo à jazida apresentou uma média de 1.173 mm, para o período compreendido entre 1962 - 1971 (55). O terreno apresenta uma drenagem moderada.

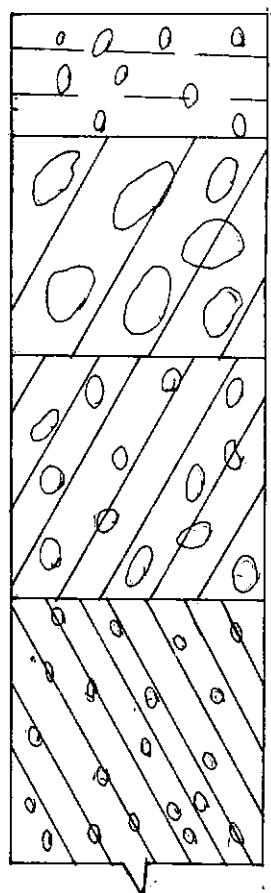
4.2.2. Jazidas Cuité e Nova Floresta.

As jazidas Cuité e Nova Floresta se encontram inseridas na zona fisiográfica da Borborema Oriental e distam uma da outra cerca de 7 Km. Levando-se em consideração a aproximação das mesmas, presume-se que ambas são resultantes de um mesmo processo de formação. Os perfis esquemático dos locais onde foram coletadas as amostras, são apresentados nas figuras 4.9a, 4.9b e 4.10. A área que envolve as jazidas pesquisadas, apresenta uma geologia correspondente ao período terciário com o topo revestido por capeamento sedimentar relacionado com a série Serra dos Martins. (56). Esta formação assenta sobre uma superfície do cristalino, bastante aplainada e intensamente caulínizada. Dando sequência, ocorrem capas de caulim,

Figura 4.9.a. Perfil esquemático da jazida Cuité: lado direito.

✓

Figura 4.9.b Perfil esquemático da jazida Cuité: lado esquerdo.



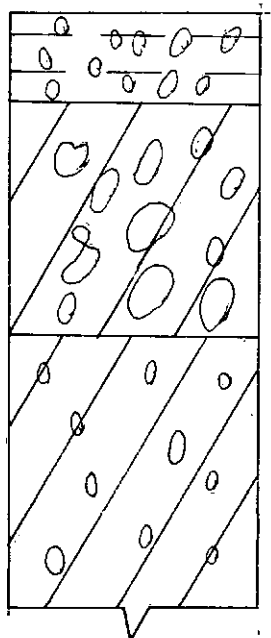
Húmus com cascalho laterítico de cor marron acinzentado. Profundidade máxima 30cm.

Pedregulho com agregados soltos cimentado por materiais finos. Diâmetro na faixa de pedregulho-matação. Matriz da argila muito rija. Espessura de cerca de 1 metro.

Pedregulho com maior proporção de materiais mais finos que a camada sobrejacente. Agregados de menores diâmetros (máx. 10cm). Espessura de aproximadamente 1 metro.

Argila média com a parte superior rija cimentada. Manchas vermelhas de ferro sobre a argila cor amarelo-clara. Fracas agregações facilmente desagregáveis, com manchas de ferro no interior. Espessura não determinada.

a



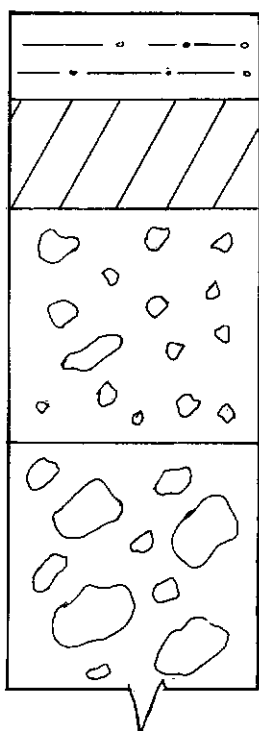
Húmus com cascalho laterítico de cor marron cinza. Profundidade variando de 10 a 20cm.

Material de cor marron com cascalho laterítico. A cor escurece mais com o aumento da profundidade da camada. Espessura variável entre 30 e 90 cm.

Pedregulho laterítico com solo matriz vermelho escuro. Espessura visível da camada até 80 cm. Profundidade da camada não determinada.

b

Figura 4.10. Perfil esquemático da jazida Nova Floresta.



Húmus com profundidade máxima de 20 cm.

Material de cor vermelho-marron fortemente cimentado. Profundidade entre 10 e 30 cm.

Material concrecionado vermelho-marron com alta proporção de finos. Profundidade entre 30 e 60 cm.

Pedregulhos concrecionados com diâmetro entre 20 e 30 cm. Profundidade desconhecida, cerca de 60 cm descoberto.

com espessura que alcança até mais de 5m, resultante do intemperismo químico do cristalino de base. Para cima a capa caulínizada passa gradativamente à formação sedimentar que é constituída por um arenito caulínítico, em geral não consolidado. Formam "plateaux" cujas superfícies se apresentam, localmente, ferruginosas. Ainda para o tipo de formação torna-se evidente uma silificação, ao que se presume secundária, resultando daí a preservação das superfícies originais do antigo planalto da Borborema, alcançando aos níveis atuais (690 a 700m). A litologia da formação Serra dos Martins torna bem provável que se trata da formação da qual se deriva a formação Barreiras pela deposição fluviátil (57). Na superfície das chapadas da formação Serra dos Martins, ocorre uma capa de pedra Canga; basicamente pode-se dizer que esta, é laterita fossilizada(57).

A relação que se verifica entre os perfis como também entre as camadas de cada perfil observada "in loco", aliada ao fato de estes depósitos ocorrerem em áreas de mudança de declividade (break of slope) de vales de rios na fase jovem, parece tornar evidente que os depósitos foram formados no próprio local, pela dissolução e remoção de íons de ferro da rocha matriz devido às condições de redução existentes. O ferro no estado ferroso foi levado para as camadas superiores, por movimentos intermitentes de ascensão do nível freático no passado, onde, encontrando condições ambientais favoráveis, foi oxidado e depositado. A hipótese de que o lençol freático tenha tido movimento de ascensão intermitente no passado, é fortalecida pela presença de vales de rios próximos ao local da jazida, o que evidencia ter existido um eficiente sistema de drenagem nesta área.

A existência da couraça no perfil da jazida Nova Floresta, também indica a formação da mesma sob condições de alternância de clima, com uma estação chuvosa intercalada com um período de estiagem, havendo portanto uma total cimentação da parte superior do horizonte em uma fase seca contínua.

Ao que tudo indica estes depósitos foram de uma maior extensão no passado, e conforme mencionado anteriormente, podem ser considerados como remanescentes de um depósito de maiores dimensões, que se salvou dos agentes intempéricos.

A região apresenta um clima Bsh semi-árido quente com uma variação de temperatura entre 17 e 28° (média das mínimas e das máximas) (58). As precipitações pluviais para o pe_ríodo 1962-1971 deram como resultado médio 877mm com duas estações bem distintas chuva no inverno e seca no verão (55).

CAPÍTULO 5

COLETA E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS
PARA UTILIZAÇÃO NA PESQUISA

5.1. Coleta dos Materiais

O procedimento geral para a coleta dos materiais con
sistiu no seguinte:

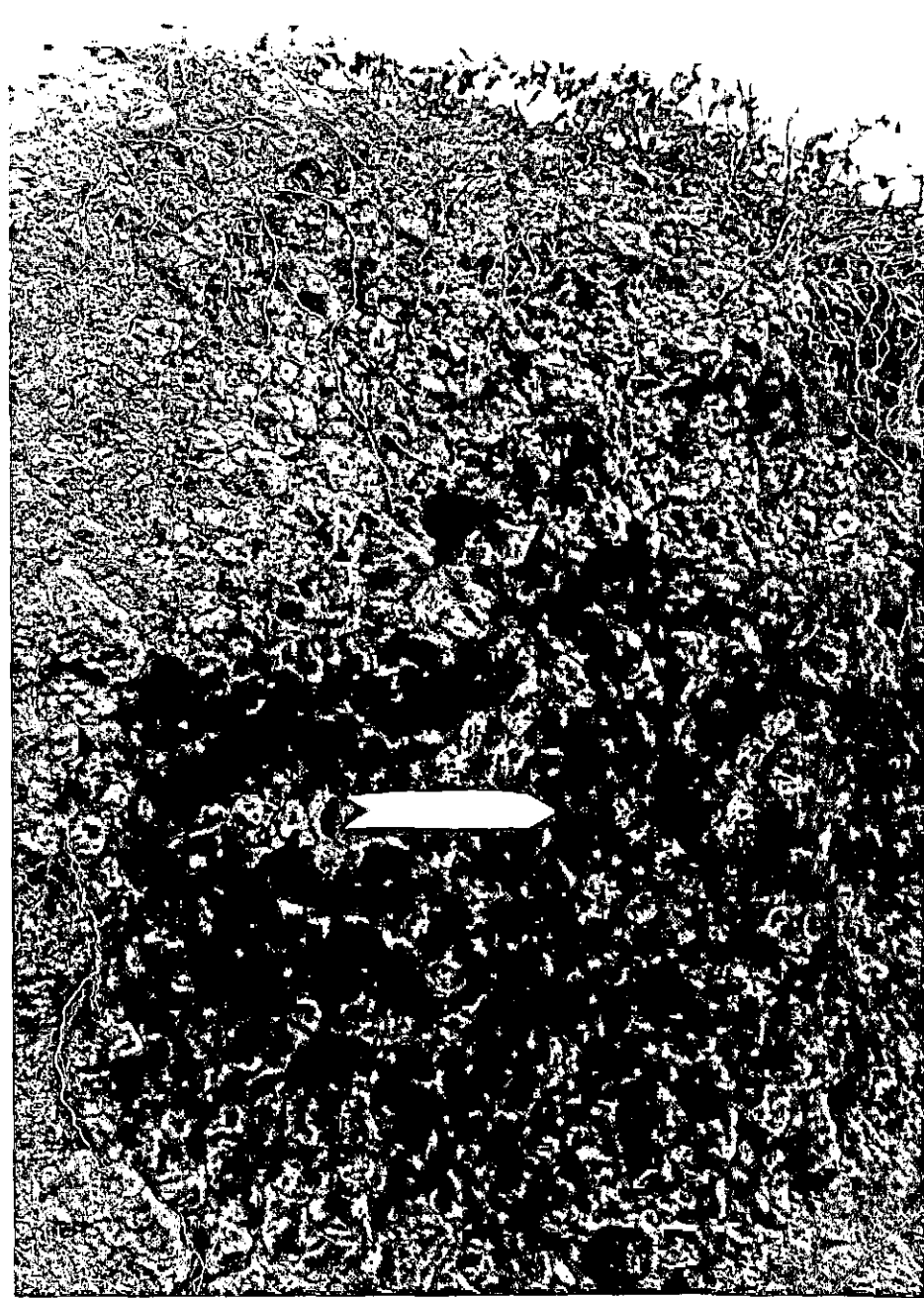
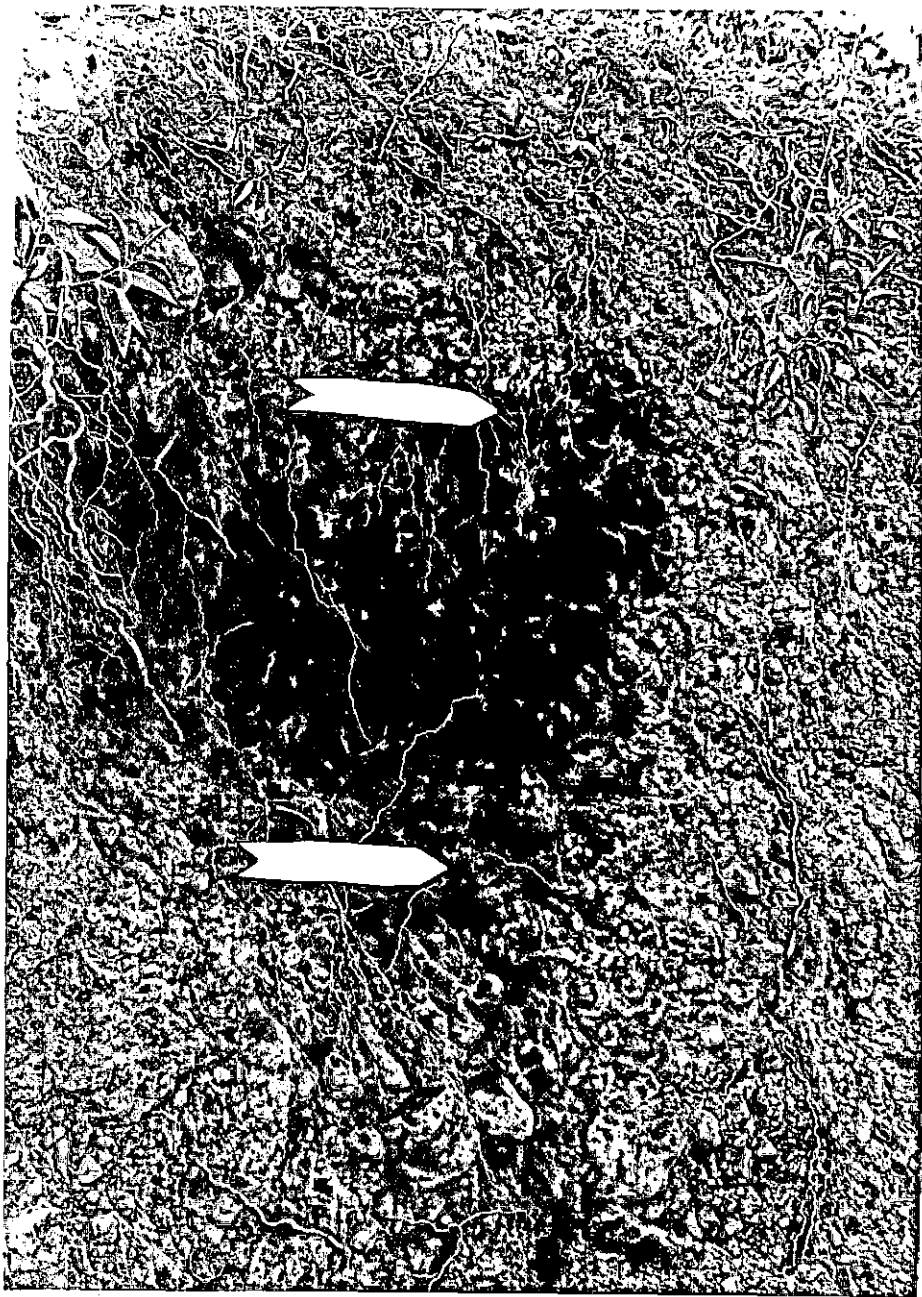
- a) Observação do perfil da jazida e seleção dos horizontes de interesse;
- b) Remoção do material solto e afetado pela ex
posição às intempéries;
- c) Escavação manual das amostras representati
vas e acondicionamento em sacos de polietileno para evitar contaminação e perda da fração fina;
- d) Transporte ao laboratório e secagem à tempe
ratura ambiente.

5.1.1. Amostragem da Jazida Cuité

Três amostras representativas foram colhidas da Jazida Cuité. As figuras 5.1.a e 5.1.b mostram os taludes verticais e níveis onde as amostras foram coletadas. No entanto, os perfis es
quemáticos correspondentes são aqueles apresentados nas figuras

Figura 5.1.a. Talude vertical da jazida Cuité. Lado direito

Figura 5.1.b Talude vertical da jazida Cuité. Lado esquerdo.



4.8 e 4.9 do capítulo anterior.

Tendo em vista satisfazer propósitos de identificação durante este trabalho, as amostras desta jazida são reconhecidas com um código numérico que é apresentado a seguir:

Código 1 Representa amostra retirada a 1,0m de profundidade em relação ao nível natural do terreno no perfil do lado esquerdo da jazida.

Código 2 Representa amostra retirada a 2,0m de profundidade em relação ao nível natural do terreno no perfil do lado esquerdo da jazida.

Código 3 Representa amostra retirada a 2,0m de profundidade em relação ao nível natural do terreno no perfil do lado direito da jazida.

5.1.2. Amostra da Jazida Nova Floresta

Nesta jazida retirou-se uma só amostra. O perfil do talude vertical onde esta foi coletada, é mostrado na Figura 5.2 e o correspondente perfil esquemático é o mostrado anteriormente na Figura 4.10 do capítulo 4.

O código numérico utilizado para esta amostra é o seguinte:

Código 4 Representa amostra retirada a 1,2m de profundidade em relação ao nível natural do terreno no centro do talude vertical.

5.1.3. Amostras da Jazida Sapê-Mari

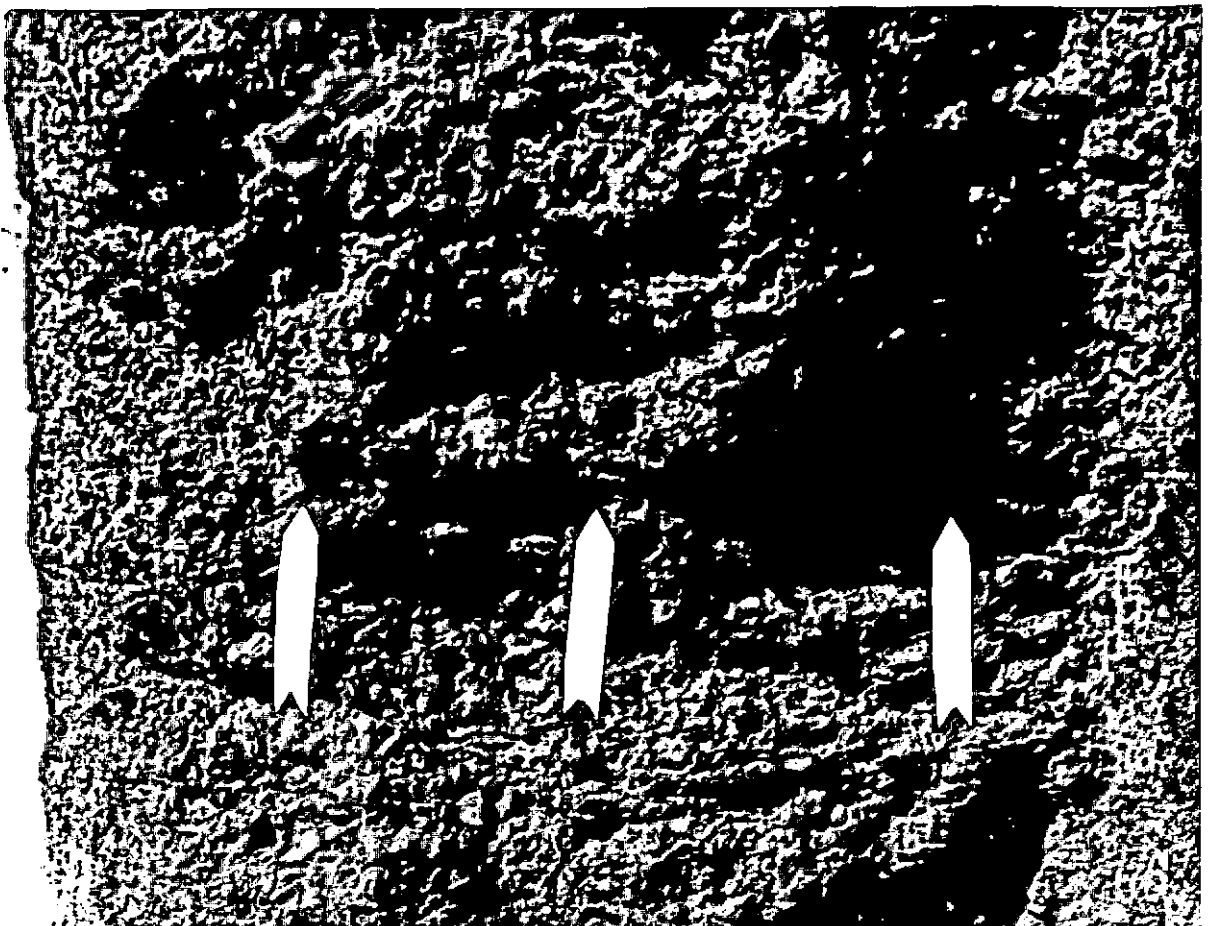
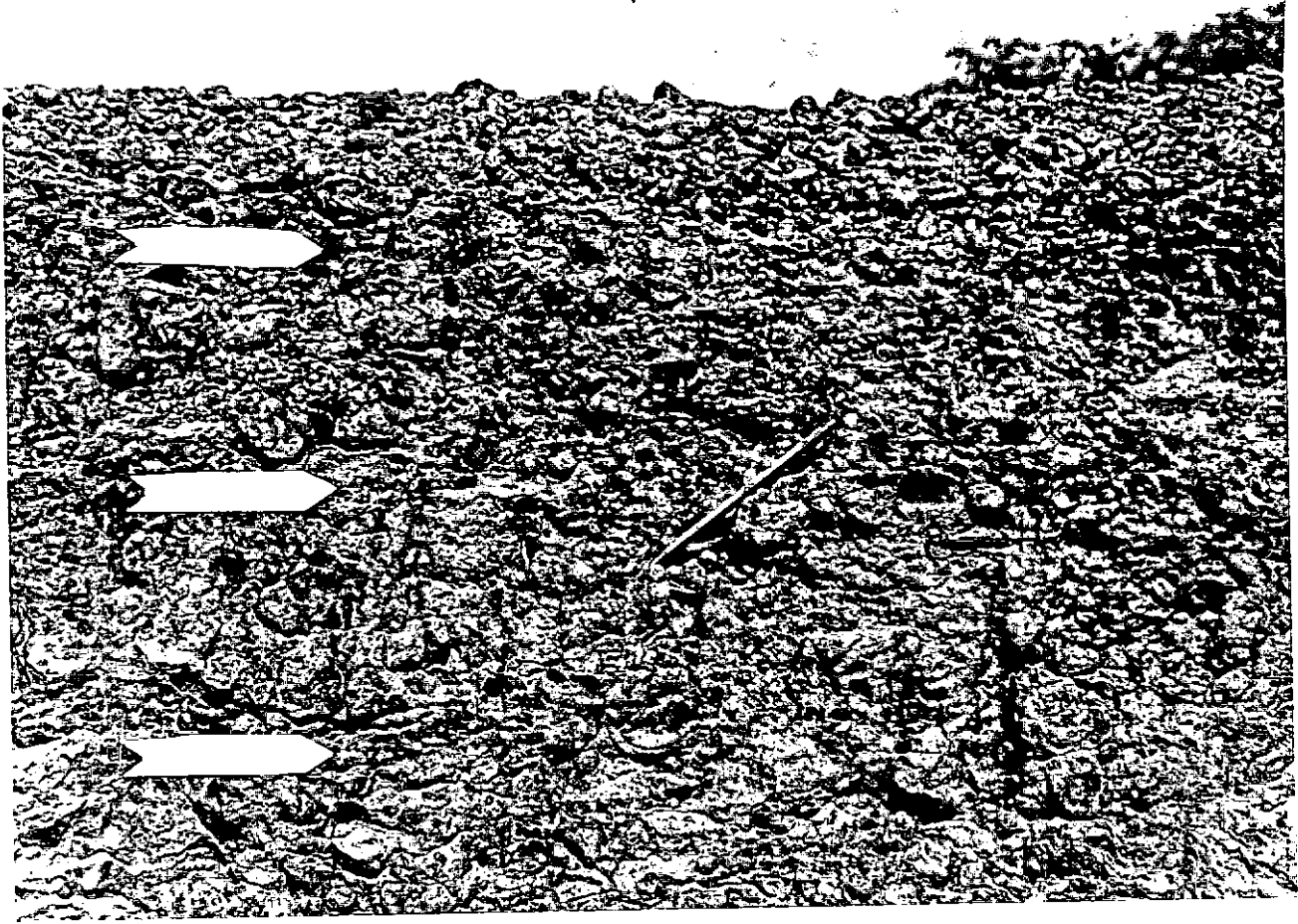
Nesta jazida, ainda foram recolhidas três amostras em um mesmo perfil. Este é mostrado nas figuras 5.3.a e 5.3.b; seu esquema foi mostrado na figura 4.1.1 do Capítulo anterior.

Figura 5.2. Talude vertical da jazida Nova Floresta.



Figura 5.3.a. Talude vertical da jazida Sapé-Mari.

Figura 5.3.b. Talude vertical da jazida Sapé-Mari.



O código numérico para identificação destas amostras é apresentado a seguir:

- Código 5 Corresponde à amostra retirada a 2,0m de profundidade em relação ao nível natural do terreno.
- Código 6 Corresponde à amostra retirada a 3,0m de profundidade do mesmo perfil.
- Código 7 Corresponde à amostra retirada a 4,0m de profundidade do mesmo perfil que as amostras anteriores.

5.2. Preparação dos Materiais no Laboratório

O caráter heterogêneo das amostras (veja figuras 5.4.a e 5.4.b) e o fato de que a distribuição percentual de diâmetro das partículas não é uma propriedade constante, devido ao grau de agregação de partículas de diâmetro menor para formar partículas de diâmetro maior, foram levados em consideração para se tomar uma decisão sobre o procedimento de preparação.

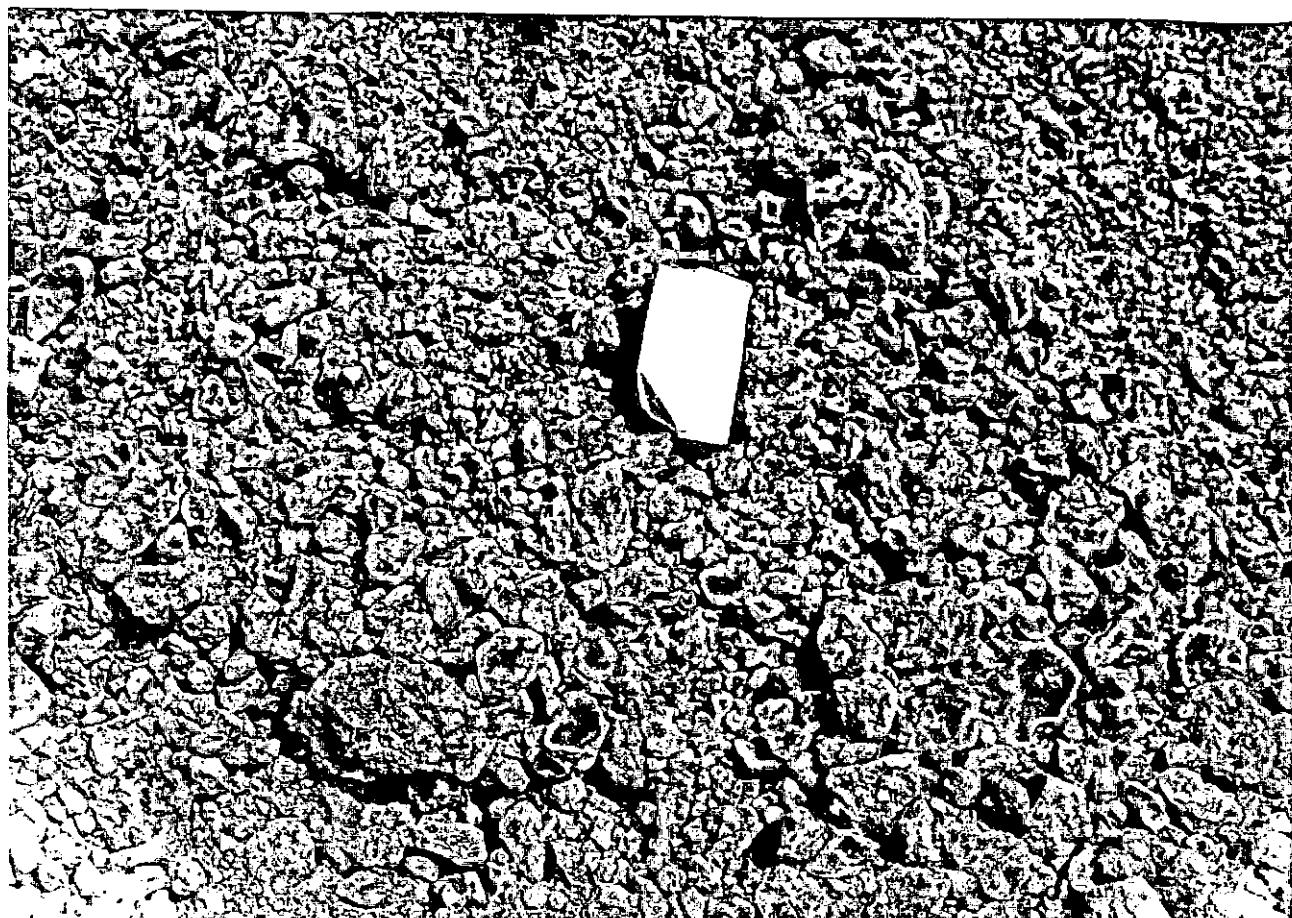
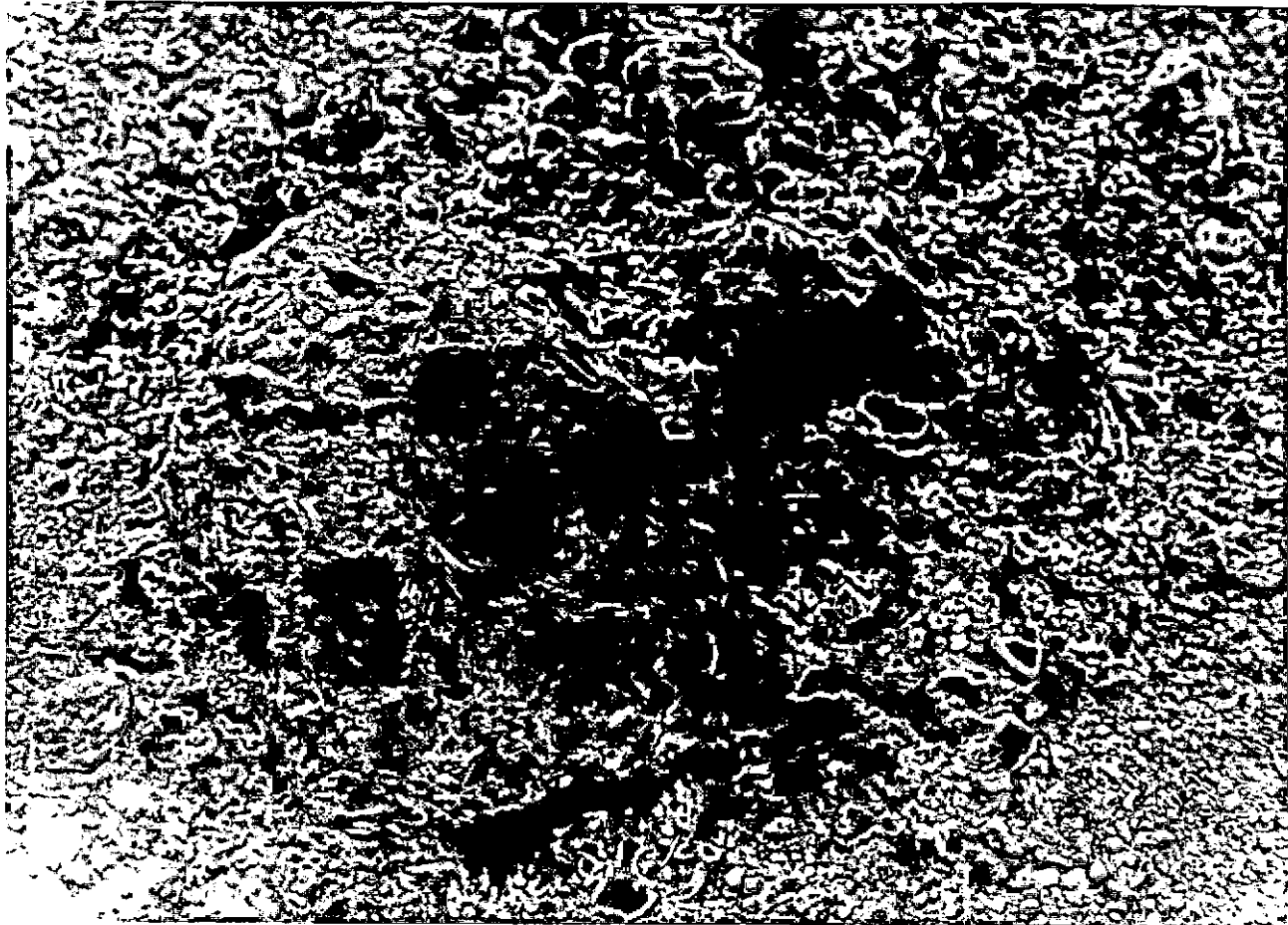
Em primeiro lugar, dividiram-se as amostras, em duas frações, uma fração do material com tamanho maior do que 9,5mm, e outra fração com tamanho menor que 9,5mm. Esta divisão arbitrária foi baseada no fato de que, visualmente, é muito sensível diferenciar partículas deste diâmetro numa amostra. Como a maior porcentagem destas partículas consiste de agregações, a fração maior que 9,5mm foi denominada "Concreção". No entanto, a fração menor que 9,5mm foi considerada como "solo" mesmo.

As duas frações, isto é, "Concreção e "Solo" foram, por sua vez, divididas em sub-frações. Esta divisão ainda foi baseada no tamanho das partículas das frações.

O procedimento para dividir a fração "Solo" em quatro sub-frações consistiu na utilização de método de peneiramento mecânico por via úmida das especificações inglesas (59) que essen

Figura 5.4.a Material escavado da jazida Cuité.

Figura 5.4.b Material escavado da jazida Sapé-Mari.



cialmente consiste de um processo de defloculação da fração solo e peneiramento deste com ajuda de uma corrente contínua de água destilada. É claro que este método mecânico só é utilizado para sub-frações com diâmetro maior que 75μ . Para o solo menor que 75μ se usou o método de sedimentação baseado na lei de Stokes. Desta maneira, para cada fração de solo se obtiveram 4 sub-frações correspondentes aos seguintes intervalos de diâmetros médios;

9,5mm a 2,0mm, 2,0mm a 0,075mm, 0,075mm a 0,002mm e menores que 0,002mm.

Para se obterem as sub-frações da fração "concreção", utilizou-se o seguinte procedimento:

Uma amostra representativa da fração "Concreção" foi imersa em água destilada por um período não inferior a quatro dias, depois do qual a amostra foi envolvida em lona e desagregada por impacto com um martelo de baquelite. A amostra assim reduzida foi desagregada em um almofariz manual, tendo-se especial cuidado de não triturar as partículas de quartzo existentes na amostra. Este procedimento permitiu, após sedimentação, obter duas sub-frações com limites de diâmetro médio igual a: 0,075mm a 0,002mm e menor que 0,002mm.

As temperaturas de secagem para todas as amostras foram limitadas a 60°C com o objetivo de evitar alterações fundamentais na composição química e mineralógica das amostras que, como se indicou no capítulo de revisão da literatura existente, são bastante comuns em muitos solos vermelhos laterizados.

O código numérico utilizado para identificação de todas as sub-frações foi alinhar ao dígito de identificação da jazida e profundidade um segundo dígito com a seguinte relação:

Segundo dígito:

| | |
|---|--|
| 0 | Sub-fração "solo" com tamanho 9,5mm a 2,0 mm; |
| 1 | Sub-fração "solo" com tamanho 2,0mm a 0,075mm; |

- 2 Sub-fração. "solo" com tamanho 0,075mm a 0,002mm;
3. Sub-fração. "solo" com tamanho menor que 0,002mm;
- 4 Sub-fração "Concreção" com tamanho 0,075mm a 0,002mm;
- 5 Sub-fração "Concreção" com tamanho menor que 0,002mm.

Assim por exemplo a sub-fração 21 corresponde a amostra da jazida Cuitê, 2m de profundidade, perfil esquerdo, com diâmetro compreendido entre 2,0mm a 0,075mm.

CAPÍTULO 6

MÉTODOS DE ENSAIOS

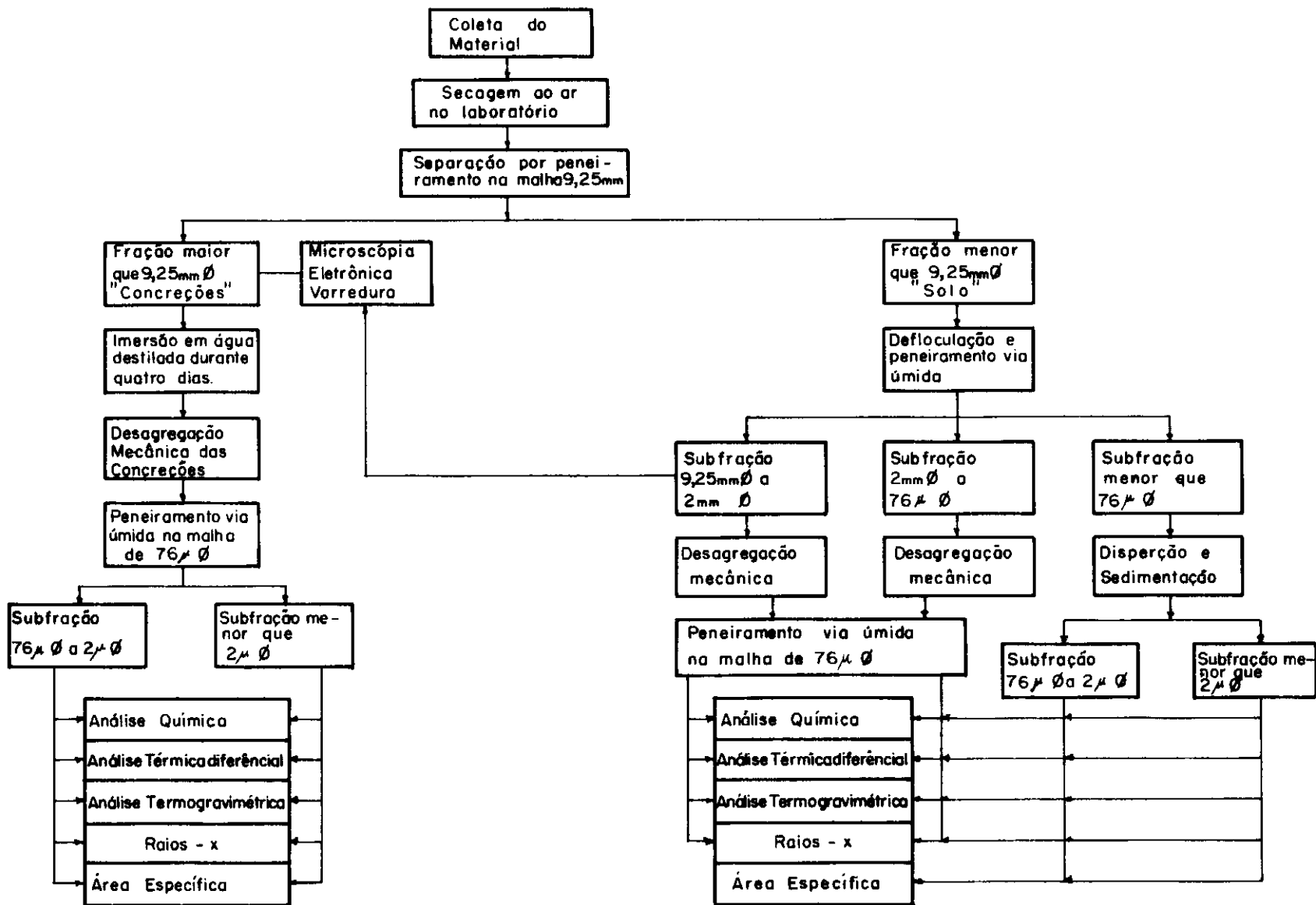
6.1. Introdução

A partir da segunda década deste século, em virtude do desenvolvimento de novas técnicas de difração de raios-X, microscopia eletrônica, análise térmica etc, o estudo da mineralogia dos materiais argilosos tem apresentado, sem dúvida alguma, um progresso considerável. Antes dessa época, a composição das argilas, por exemplo, era determinada através das análises químicas. Ao que se supunha, eram substâncias amorfas. Por outro lado, pensava-se também que a caulinita (silicato de alumínio hidratado) era o único argilo mineral existente, e que, misturado a diversas impurezas, constituía os vários materiais argilosos conhecidos (60).

Os métodos utilizados nesta pesquisa foram: Análise química, análise térmica diferencial e termogravimétrica, raios-X, microscopia eletrônica de varredura e um método gravimétrico para determinação da área específica. As subfrações dos materiais das três jazidas usados na pesquisa foram analisadas para se obter informações referentes a sua composição química e mineralogia, as quais posteriormente foram utilizadas para interpretação dos modos de formação e propriedades dos solos vermelhos estudados.

O fluxograma da figura 6.1 mostra esquematicamente o processo de preparação descrito no capítulo anterior e indica as análises realizadas com as diferentes subfrações.

Figura 6.1 Fluxograma de ensaios de laboratório.



6.2. Análise Química

Mesmo levando em consideração que a análise química não permite uma avaliação completa da composição mineralógica e das propriedades físico-química de um material, ela fornece dados que são de grande utilidade prática e acadêmica(61).

A composição química das subfrações dos materiais estudados foi determinada usando-se processos gravimétricos, volumétricos e instrumentais. Estes processos são apresentados em detalhe no Apêndice A e são basicamente aqueles usados nos laboratórios de Química da SUDENE. Este organismo baseou a preparação dos procedimentos em livros e textos conhecidos (62, 63, 64).

6.3. Análise Térmica

Os dois principais métodos de análise térmica são termogravimetria e análise térmica diferencial. Neles se medem mudanças de peso e de calor respectivamente, quando o sistema é aquecido a uma razão uniforme de incremento de temperatura.

A análise termogravimétrica (T.G.) fornece informações sobre os processos que ocorrem com mudanças de peso e permite seguir diretamente à estequiometria de uma reação.

A análise térmica diferencial (A.T.D.), por outro lado, é de aplicação mais geral, permite detectar, em adição, a mudança de fase, fusão e reação do estado sólido que ocorre sem mudanças de peso. Todavia, a análise térmica diferencial não é intrinsecamente quantitativa. Isto acontece porque a A.T.D não mede o calor total associado com uma reação, mas a variação de temperatura produzida no sistema experimental de medição. Por isso, é necessário proceder a uma calibração antes de se poder obter valores quantitativos e estes só são válidos para as condições do sistema experimental particular.

Portanto, A.T.D. e T.G. são métodos complementares e, muitas vezes, é necessário usá-los em conjunto para poder caracterizar o comportamento térmico de um sistema.

Todos os métodos de análise térmica são de natureza dinâmica, por isso os resultados de T.G. e A.T.D. são marcadamente influenciados pelas condições experimentais. Estas incluem tamanho da amostra e distribuição, isto é: por exemplo, se a amostra está espalhada numa camada delgada ou compactada em uma coluna longa, a natureza da bacia, a razão de incremento de temperatura e o ambiente atmosférico.

Assim, deve-se ter cuidado para correlacionar dados de T.G. e A.T.D. para uma mesma substância, quando os ensaios são conduzidos em diferentes aparelhos. É claro então que o uso de um método para análise simultânea de T.G. e A.T.D. é muito vantajoso, porque nesta ambas análises são conduzidas na mesma amostra.

A técnica de análise simultânea T.G. A.T.D. é de origem recente. A maioria dos trabalhos pioneiros neste campo foi iniciada por Paulik e Erdey da Universidade Técnica de Budapest (65). No momento, existem vários aparelhos comerciais para análise simultânea. A informação obtida é, às vezes, maior do que aquela que se pode obter em aparelhos separados. No entanto, a análise simultânea não deve ser considerada como um substituto da análise T.G. e A.T.D. conduzidas separadamente, mas como uma técnica adicional.

A análise térmica durante a realização desta pesquisa foi conduzida utilizando-se equipamentos separados.

6.3.1. Análise térmica diferencial

Na A.T.D. as medidas se fazem por registro contínuo da diferença de temperatura entre a amostra e um material de referência que é termicamente inerte. Este registro é normalmente conseguido utilizando-se um sistema de termopares opostos convenientemente amplificado.

As curvas de A.T.D. fornecem grandes quantidades de informações referentes ao comportamento físico e químico dos materiais.

As mudanças físicas que se podem estudar, incluem fusão, congelamento, sublimação e vaporização; fenômenos de transição cristalino e vítrio, e medidas de calor específico.

As mudanças químicas incluem decomposição, desidratação, degradação e reações de estado sólido.

As primeiras aplicações de A.T.D. foram feitas no campo da mineralogia, dando uma ferramenta útil para identificação rápida de minerais e para elucidar os constituintes de perfis de solos (61). Assim, o método é de muito valor para o reconhecimento e diagnóstico no estudo dos solos.

Nesta pesquisa, o método foi usado para identificação dos componentes mineralógicos dos solos estudados em conjunto com as outras técnicas descritas. O aparelho utilizado foi um "Delta Therm" modelo DTA D 6000 (66) e as condições de ensaios foram as seguintes:

| | |
|------------------------------------|--------------|
| Razão de incremento de temperatura | 10°C/minuto |
| Velocidade do papel de registro | 7,6mm/minuto |
| Sensibilidade | 10°C/25,4mm |
| Temperatura máxima | 1.000°C |

6.3.2. Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica fornece informações quantitativas em todos os processos que ocorram com mudanças de peso, e permite seguir a estequiometria de uma reação diretamente. Os estudos de T.G. podem fornecer informações valiosas nos seguintes fenômenos físicos e químicos:

- a) Mudanças físicas de vaporização, sublimação, absorção, adsorção e dissorção;
- b) Mudanças químicas de decomposição, degradação oxidativa, dessolvição, reações de estado sólido envolvendo perda de peso, reações sólido-gás (por exemplo oxidação e redução).

A.T.G. é usada com sucesso considerável no estudo das seguintes classes de reações:

- 1) Perda de água absorvida e adsorvida; tais processos de desidratação podem ser simplesmente de estágio múltiplo;
- 2) Reações de decomposição, as quais não envolvem a atmosfera;
- 3) Reações que envolvem especificamente a atmosfera, por exemplo, a degradação oxidativa de materiais. Em particular reações sólido-gás.

Para o estudo desta pesquisa se utilizou uma balança termogravimétrica "Stanton Redcroft" (67). As condições para os ensaios foram as seguintes:

Peso da amostra 1g.

Velocidade de aquecimento 5°C/minuto

Velocidade do papel 2,54 mm/minuto

6.4. Difração de Raios-X

Um melhor conhecimento sobre as argilas minerais somente foi conseguido com a revelação de sua estrutura cristalina por meio do método de difração de raios-X. Apresenta-se este método como um dos melhores meios para a pesquisa da estrutura cristalina dos minerais, bem como para a sua respectiva identificação (68).

Os raios-X são radiações eletromagnéticas da mesma natureza que as radiações que compõem a luz branca, sendo que os comprimentos de onda dos raios-X são cerca de mil vezes menores que os comprimentos de onda da luz visível, resultando daí uma grande diferença nas propriedades dos dois tipos de radiações (60).

Os raios-X têm origem da seguinte maneira:

- a) Quando um elétron, movendo-se a alta veloci

dade, vai de encontro a um alvo metálico, desloca elétrons orbitais mais para o interior do átomo metálico; por sua vez, ao se deslocarem, tendo recebido a energia do projétil, emitem radiações de determinado comprimento de onda e intensidade.

- b) Quando há desaceleração de um elétron num campo elétrico há decrescimo de energia do elétron, que vai reaparecer como radiações de raios-X de certa frequência: trata-se da radiação branca.

Na distribuição regular dos átomos no espaço em qualquer mineral, formam estes em seu conjunto estrutural planos em placas paralelas, nos quais os raios-X sofrem difrações, atingem os raios-X, que têm grande força de penetração, todos os planos sucessivos apresentando os raios difratados uma frequência múltipla "n" do comprimento de onda. Para um dado comprimento de onda o ângulo de incidência, para o qual o raio-X é susceptível de experimentar difração (2δ), dependerá da distância "d" entre os planos reticulados de acordo com a equação de Bragg.

$$\text{Sen } \delta = \frac{n\lambda}{2d}$$

Portanto, a cada grupo de planos reticulados com determinada distância "d" entre eles corresponderão alguns ângulos em cuja direção o raio-X permite difração e, como esta distância varia de acordo com o tipo de argilo-mineral, obtêm-se diagramas de difração características para cada um (68).

Para análise de difração de raios-X, durante este trabalho foram usadas as subfrações de "solo" e "concreção" previamente reduzidas a tamanho máximo de 75μ de diâmetro.

O equipamento utilizado foi um Difratômetro de raios-X marca Philips com registrador gráfico com as seguintes características:

Tubo Cuka

$$I = 4 \cdot 10^2 . 2$$

$$V = 1^0/2 \text{ minutos}$$

$$\text{Papel} = 10\text{mm/minuto}$$

6.5. Microscopia Eletrônica de Varredura

Os avanços dos conhecimentos em biologia, física, química e tecnologia, dependem, em sua maior parte, das observações que podem ser efetuadas na microestrutura destes materiais. O poder de resolução do olho humano é da ordem de 0,2mm, isto é de 2.000.000 \AA , enquanto que os detalhes da microestrutura se situam muito abaixo de 1 \AA . Para a observação desse tipo de estrutura, utiliza-se normalmente a lupa e o microscópio ótico. Há, contudo, problemas cujo estudo envolve o conhecimento de estruturas de dimensões abaixo do poder de resolução dos instrumentos óticos comuns, mesmo quando se empregam recursos especiais como a luz ultravioleta. O microscópio eletrônico com poder de resolução de 10 \AA permite a observação de partículas cujas dimensões correspondem às orgânicas de peso molecular acima de 50.000 (61).

As observações mega, macro e microscópicas podem ser ampliadas com a ajuda de novas aparelhagens de ótica eletrônica: os microscópios eletrônicos de transmissão e de varredura por exemplo.

O microscópio eletrônico de varredura tem comprovado ser de grande importância no estudo da micro-estrutura de solos, particularmente quando existe algum interesse em colher opinião a respeito da afinidade, distribuição e justaposição de diferentes elementos num solo. Sua grande vantagem é que a amostra pode ser examinada em três dimensões (69, 70, 71).

Em tempos passados, os dados morfológicos eram principalmente macroscópicos. Eles eram baseados unicamente na descrição do perfil pedológico, diferenciado em horizontes. Desta maneira, somente dois tipos de dados eram fornecidos, com muita imperfeição, em virtude da necessidade de escalas microscópicas, para

que eles sejam acessíveis, quais sejam:

- a) identificação dos constituintes no local;
- b) estudo das relações que apresentam estes constituintes.

Como as rochas, os solos e os materiais que os constituem, são de fato bem caracterizados, desde que se possa definir concomitantemente a natureza de seus constituintes e o arranjo estrutural, no local, dos mesmos (72).

Uma vez que a análise morfológica é unicamente macroscópica e descritiva, a natureza destes constituintes pode ser obtida indiretamente por análises químicas, ou mineralógicas, realizadas sobre amostras perturbadas. Deste modo, as maneiras de associação dos constituintes são então presumidas ou deduzidas a partir das propriedades físico-químicas ou mecânicas de cada um dos constituintes (72).

A investigação da microestrutura nesta pesquisa foi efetuada, nas amostras provenientes das três ocorrências escolhidas, usando-se um microscópio eletrônico a varredura "Stereoscan Mark 2" da "Cambridge Instrument Company" pertencente ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Leeds, Inglaterra. O procedimento para a preparação das amostras é dado no Apêndice C.

6.5. Área Específica

A denominação de "área específica" refere-se à superfície externa das partículas de um sólido pulverulento referida à unidade de massa (mais raramente por volume), a qual é normalmente expressa em m^2/g ou cm^2/g (73).

Como se tem conhecimento, as argilas apresentam usualmente vários hábitos cristalinos e uma diversificada gama de valores das dimensões das partículas, além da forma anisométrica (placas e tubos) (74), o que dificulta a determinação de sua área específica e faz com que ocorra um grande número de métodos para sua

determinação, os quais fornecem resultados nem sempre concordantes (73).

Neste trabalho decidiu-se utilizar um método gravimétrico, proposto por Diamond e Kinter (75), o qual considera que, em condições de equilíbrio, a retenção de glicerol na superfície do material é monomolecular em espessura. O procedimento utilizado para a determinação de área específica nas subfrações de tamanhos $75\mu\phi$ a $2\mu\phi$ e menor que $2\mu\phi$ está mostrado no Apêndice D.

CAPÍTULO 7

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

7.1. Introdução

Como foi indicado no Capítulo 5, as amostras das três jazidas obtidas dos diferentes horizontes foram inicialmente divididas arbitrariamente em duas frações utilizando como limite entre elas o tamanho correspondente ao diâmetro de 9,5mm. A fração retida na peneira de 9,5mm foi considerada como "concreção" e a fração passando na peneira de 9,5mm foi denominada fração "solo". As concreções foram por sua vez desagregadas mecanicamente e divididas em duas subfrações, uma correspondente ao tamanho entre 76μ e 2μ e a outra correspondente ao tamanho menor que 2μ . No entanto, a fração solo foi dividida por peneiramento (via úmida) em quatro subfrações correspondentes aos seguintes limites de diâmetros em mm: 9,5 a 2; 2 a 0,076; 0,076 a 0,002 e menor que 0,002.

Análise química e análise térmica, tanto termogravimétrica como termogravimétrica, foram executadas em todas as subfrações das concreções e solos das três jazidas. No entanto, o estudo utilizando-se o microscópio eletrônico de varredura e as medições de área específica foi somente feito com algumas das subfrações das "concreções" e "solos".

Os resultados dos ensaios que são apresentados a seguir, foram realizados nos laboratórios do Centro de Ciências e Tecnologia da UFPb, no laboratório de Química da Superintendência para

o Desenvolvimento do Nordeste (Sudene) e no laboratório de microscopia electrónica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Leeds, Inglaterra.

7.2. Análise Química

Usando os métodos descritos no Capítulo 6 e apresentados em detalhes no Apêndice A, as seguintes determinações foram feitas:

- a) Teor de umidade a 110°C ,
- b) Teor de umidade a 1000°C ,
- c) Teor de óxidos de Silício, Ferro, Alumínio, Titânio, Cálcio, Magnésio, Manganês, Fósforo, Sódio, Potássio e Enxofre,
- d) Análise foi ainda feita para determinação elementar de Estrôncio, Cobre e Zinco. Os valores foram, com exceção da amostra no. 23, desprezíveis. Para esta amostra se encontrou um valor de 0,12% de Cobre. As tabelas B.1, B.2, e B.3 do Apêndice B incluem os resultados completos da análise química.

Entendendo-se que as propriedades dos solos laterizados são significativamente afetadas principalmente pela concentração em forma dos elementos Fe, Si, e Al, nesta apresentação se dá especial consideração a eles. No entanto, parece importante assinalar que em algumas subfrações a análise química mostrou concentração pouco usual de Fósforo determinado como P_2O_5 que poderia ter significação nas propriedades destes solos. Este ponto será discutido mais adiante.

Pode-se observar de um modo geral que a composição química das subfrações do solo obedece à seguinte ordem:

sílica > alumina > ferro

No entanto, para as subfrações das concreções, a ordem de abundância de compostos é:

ferro > sílica > alumina

As variações entre subfrações das diferentes camadas é apresentada a seguir para as jazidas de Cuité e Nova Floresta e depois para a jazida de Sapé-Marí.

7.2.1. Jazidas de Cuité e Nova Floresta

As variações do teor de sílica em função do diâmetro médio das subfrações mostraram que existe um teor máximo de sílica para as subfrações de diâmetro médio correspondente ao tamanho silte da fração solo; no entanto para as subfrações da fração concreção a porcentagem de sílica incrementa muito pouco com o aumento do diâmetro médio e em um caso diminui marcadamente. Estas tendências estão mostradas nas Figuras 7.1a, e 7.3a; seus correspondentes valores numéricos são apresentados no apêndice B nas Tabelas B.1, B.2 e B.3. Um fato interessante nas relações é que a quantidade de sílica diminui para as frações de diâmetros maiores que o correspondente ao tamanho silte. Uma interpretação aceitável para isto é que o aumento de sílica entre a fração tamanho argila e a fração tamanho silte deve-se principalmente à presença de sílica amorfa e secundariamente ao conteúdo de quartzo das frações maiores.

As Figuras 7.1b e 7.3a. mostram as relações do teor de alumina em função do diâmetro médio das subfrações. Estas relações mostram que o teor de alumina é pouco afetado pelo tamanho da subfração para o caso da fração solo; pode-se dizer que em geral há uma tendência à constância de teor de alumina. No entanto, para as subfrações das concreções há uma notável diminuição do teor de alumina entre a subfração tamanho argila e tamanho silte.

As relações do teor de ferro versus tamanho médio das subfrações são mostradas nas Figuras 7.1c e 7.3a para as jazidas de Cuité e Nova Floresta respectivamente. Pode-se notar que para as subfrações da fração solo o teor de ferro é quase constante,

com exceção da subfração de diâmetro maior para o qual o teor de ferro é notavelmente maior. Para as duas subfrações da fração concreção os teores de ferro são maiores que para as subfrações da fração solo e as diferenças entre as subfrações tamanho argila e silte são muito marcantes.

A relação molecular sílica/sesquióxidos (S/R) versus tamanho médio das subfrações é mostrada nas Figuras 7.2a e 7.2b. As tendências para as subfrações da fração solo mostram uma relação interessante que de um certo modo é reflexo das tendências descritas para teor de Sílica, Ferro e Alumina. A razão S/R é menor que 2 para todas as subfrações da fração concreção. No entanto, para a fração solo a razão S/R mostra um máximo para a subfração de diâmetro médio correspondente ao tamanho silte. Outra vez, aqui pode-se notar que este fenômeno ocorre devido à influência da sílica amorfa nesta subfração.

Finalmente para os materiais das jazidas Cuité e Nova Floresta, as relações entre a razão sílica/alumina (S/A) e diâmetro médio das subfrações é dada nas Figuras 7.2b e 7.3c. O mais interessante destas relações é que a razão S/A de todas as subfrações com diâmetro médio correspondente ao tamanho argila tem valor muito perto de 2; no entanto, as subfrações com diâmetro médio correspondente ao tamanho silte têm valores notavelmente maiores que 2. As implicações disto serão discutidas no Capítulo seguinte.

7.2.2. Jazidas de Sapé-Mari.

Um fato muito interessante com as subfrações da jazida Sapé-Mari foi que durante a preparação para subfracionamento as partículas de diâmetro entre 9,5 mm e 2 mm, após lavagem com água destilada, desagregaram completamente; por isso, os resultados mostrados nas Figuras 7.4a, 7.4b, 7.4c, 7.5a e 7.5b não registram teores de composição química para o diâmetro médio 4,8 mm. As relações destas figuras mostram que as tendências de variação são similares à dos materiais de Cuité e Nova Floresta. Apenas cabe ressaltar que o teor de ferro se mostrou maior para todas as subfrações provenientes da amostra de profundidade de 4 metros.

Figura 7.1a. Variação do teor de SiO_2 nas subfrações da fração "Solo" e da fração "Concreção". Jazida Cuité.

Legenda

- + Amostra 10 a 15
- Amostra 20 a 25
- Amostra 30 a 35
- Solo
- Concreção

Figura 7.1b. Variação do teor de Al_2O_3 nas subfrações da fração "Solo" e da fração "Concreção". Jazida Cuité.

Figura 7.1c. Variação do teor de Fe_2O_3 nas subfrações da fração "Solo" e da fração "Concreção". Jazida Cuité.

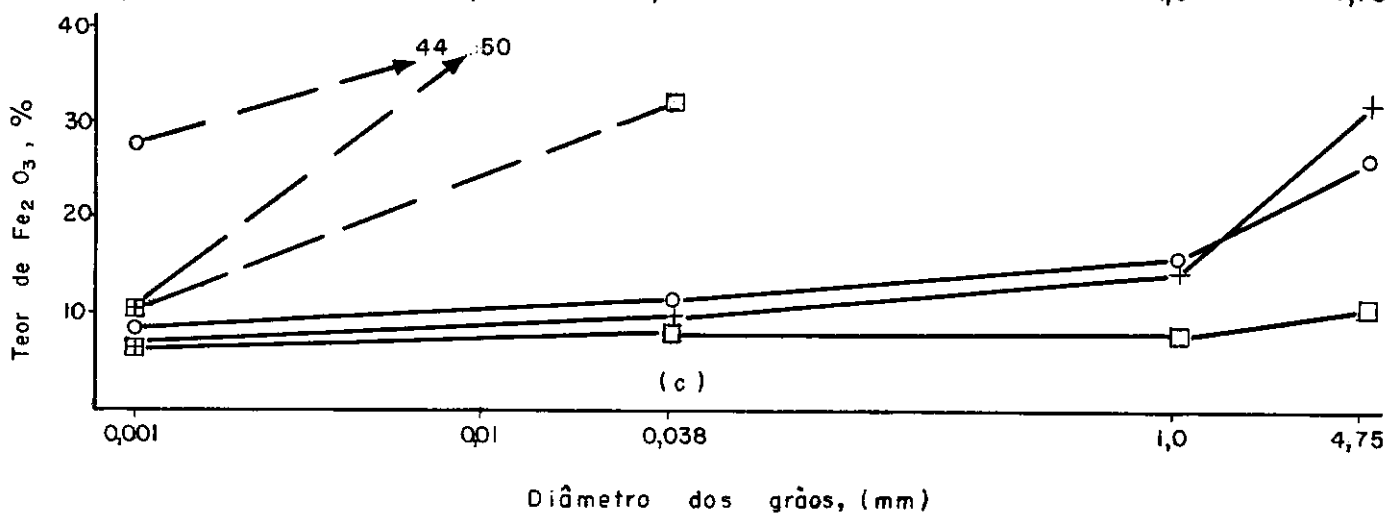
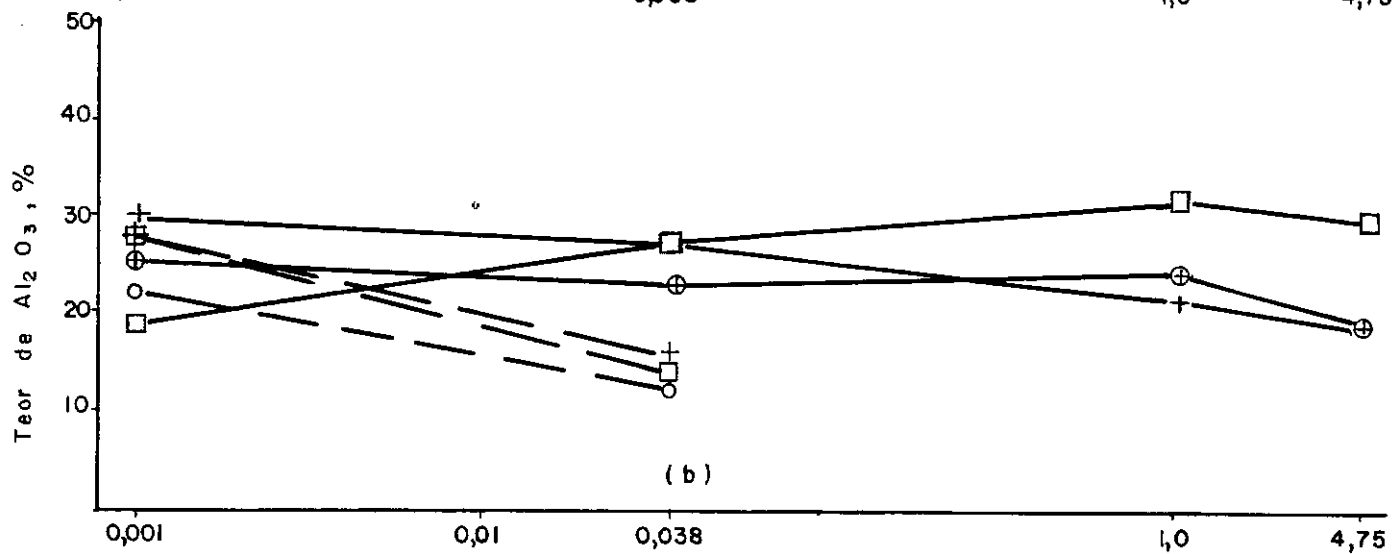
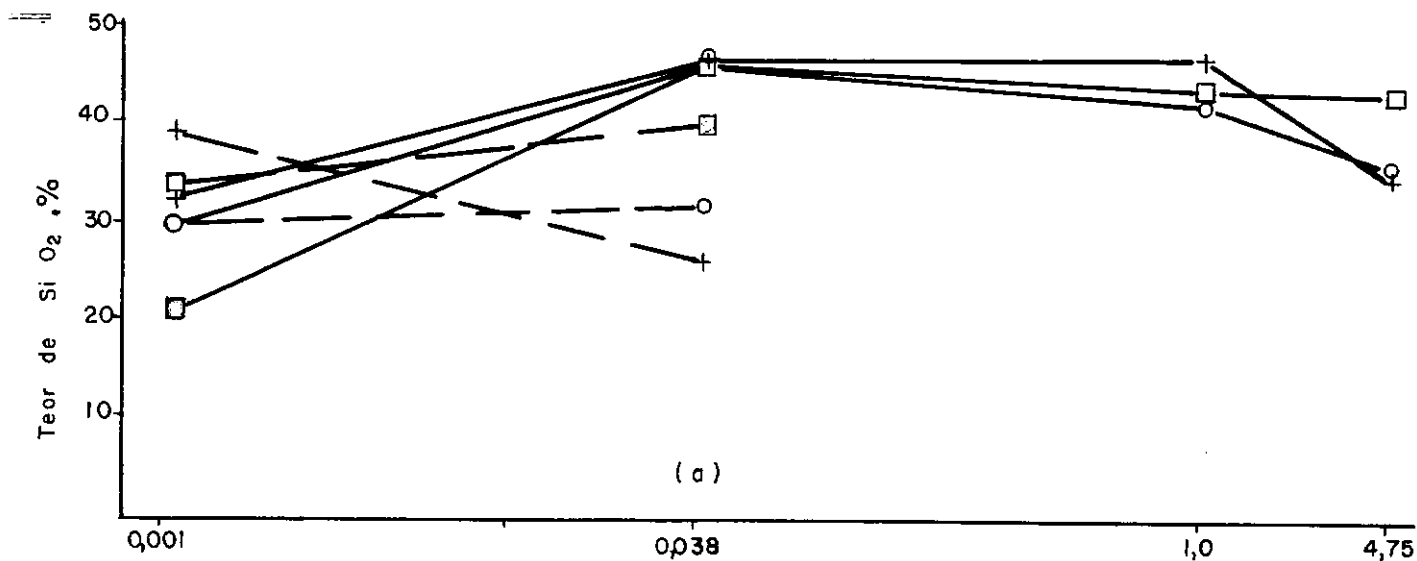
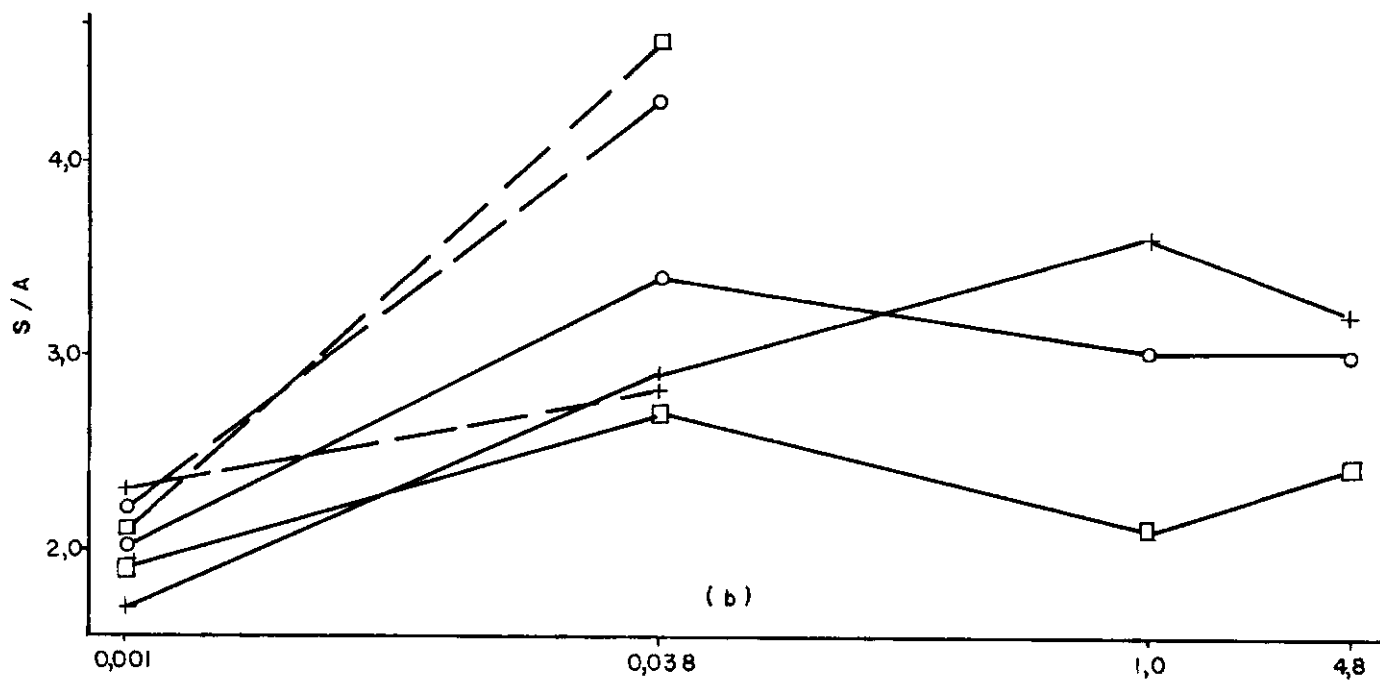
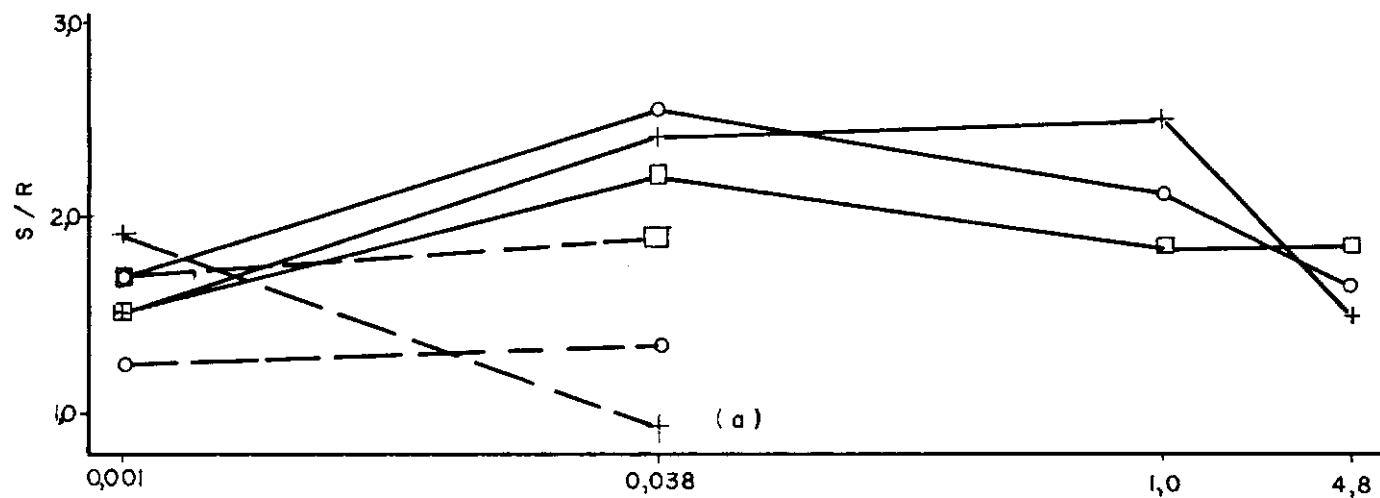


Figura 7.2a. Variação da relação sílica/sesquióxidos (S/R) nas subfrações da fração "Solo" e da fração "Concreção". Jazida Cuité.

| Legenda | | | |
|---------|-----------|----|------|
| + | Amostra | 10 | a 15 |
| □ | Amostra | 20 | a 25 |
| ○ | Amostra | 30 | a 35 |
| — | Solo | | |
| ----- | Concreção | | |

Figura 7.2b. Variação da relação sílica/alumina (S/A) nas subfrações da fração "Solo" e da fração "Concreção". Jazida Cuité.



Diâmetro dos grãos, (mm)

Figura 7.3a. Variação dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 nas subfrações da fração "Solo" e da fração "Concreção". Jazida Nova Floresta.

Legenda

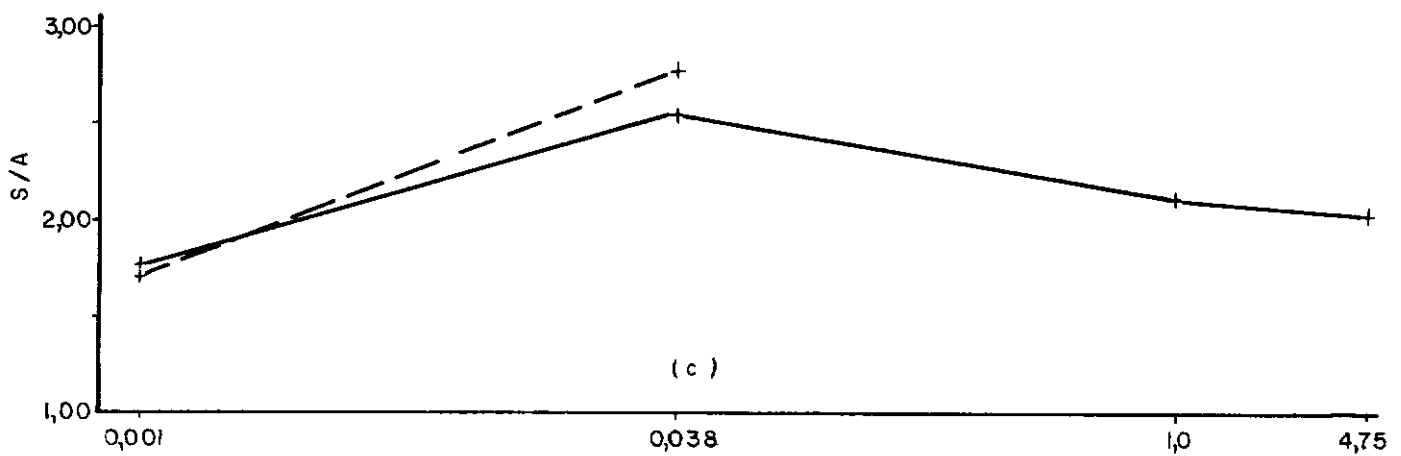
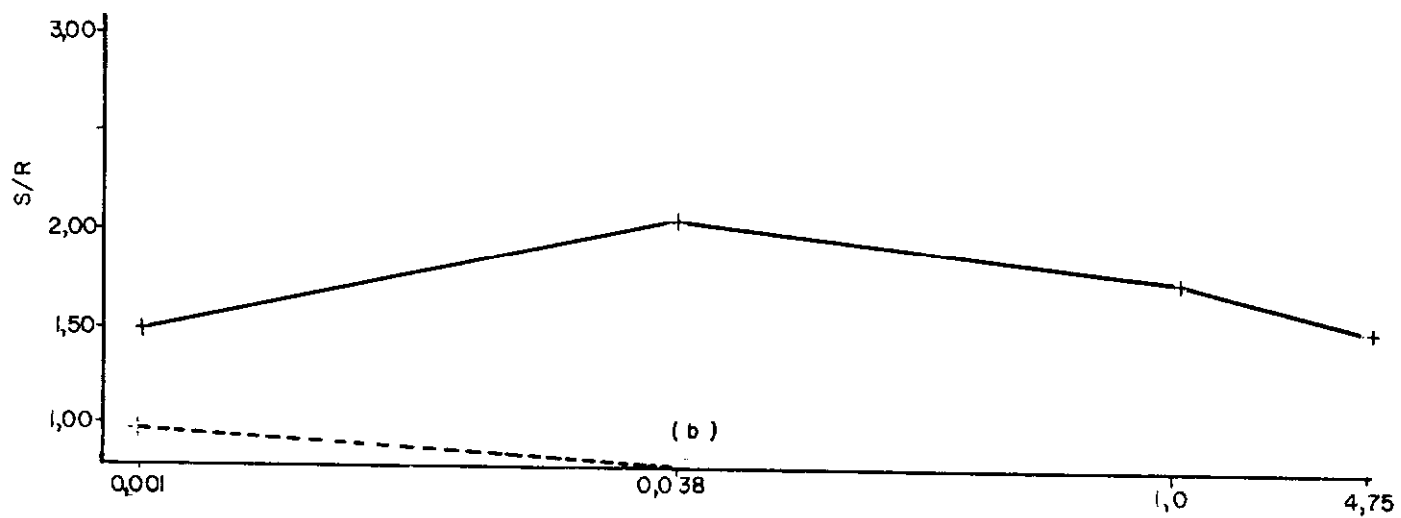
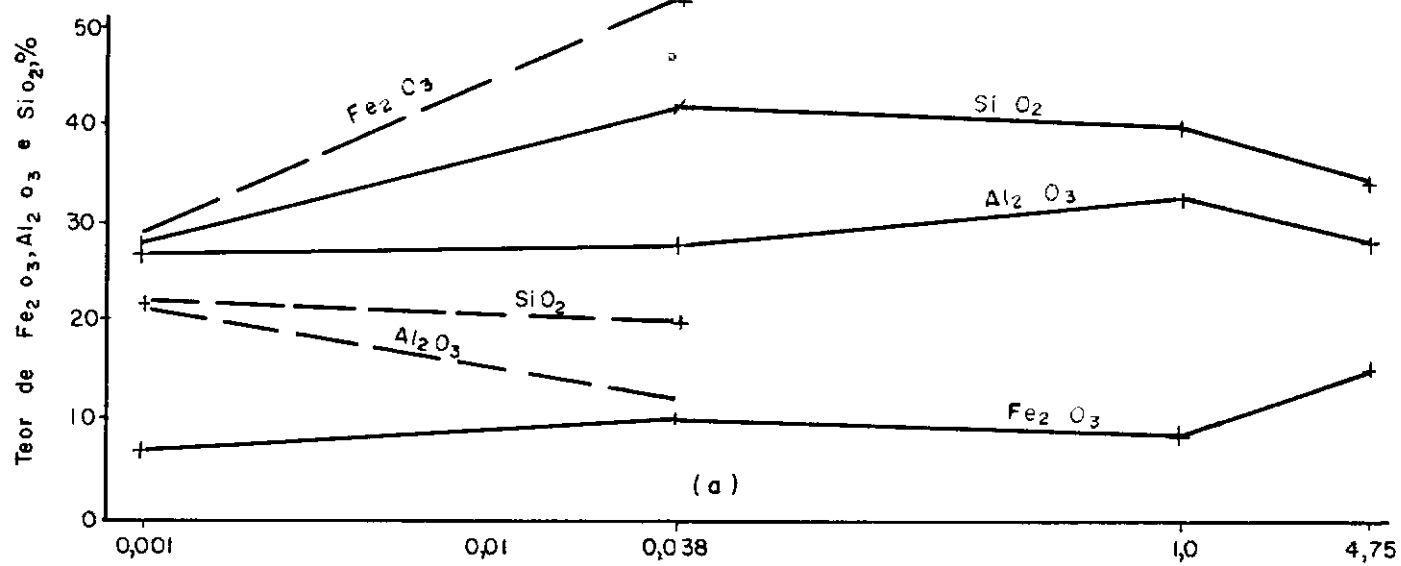
+ Amostra 40 a 45

—— Solo

----- Concreção

Figura 7.3b. Variação da relação sílica/sesquióxidos (S/R) nas subfrações da fração "Solo" e da fração "Concreção". Jazida Nova Floresta.

Figura 7.3c. Variação da relação sílica/alumina (S/A), nas subfrações da fração "Solo" e da fração "Concreção". Jazida Nova Floresta.



Diâmetro dos grãos, (mm)

Figura 7.4a. Variação do teor de SiO_2 nas subfrações da fração "Solo" e da fração "Concreção". Jazida Sapé-Mari.

legenda

| | | | |
|-------|------------|---|-----------|
| +• | Amostra 51 | a | 55 |
| □ | Amostra 61 | a | 65 |
| ○ | Amostra 71 | a | 75 |
| ————— | | | Solo |
| ----- | | | Concreção |

Figura 7.4b. Variação do teor de Al_2O_3 nas subfrações da fração "Solo" e da fração "Concreção". Jazida Sapé-Mari.

Figura 7.4c. Variação do teor de Fe_2O_3 nas subfrações da fração "Solo" e da fração "Concreção". Jazida Sapé-Mari.

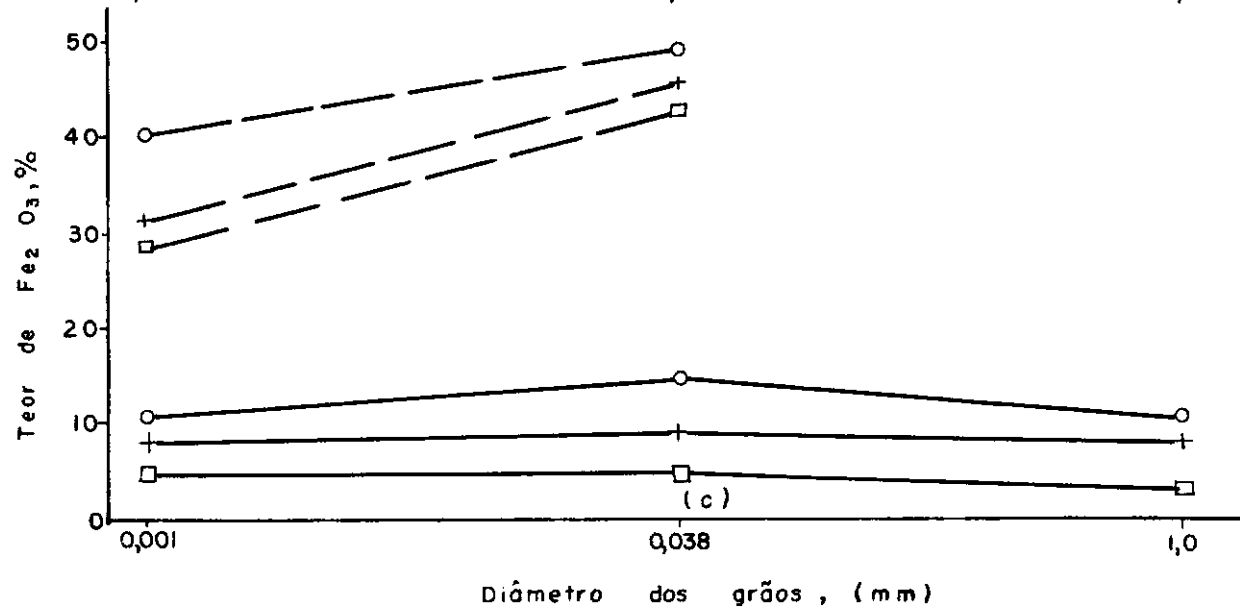
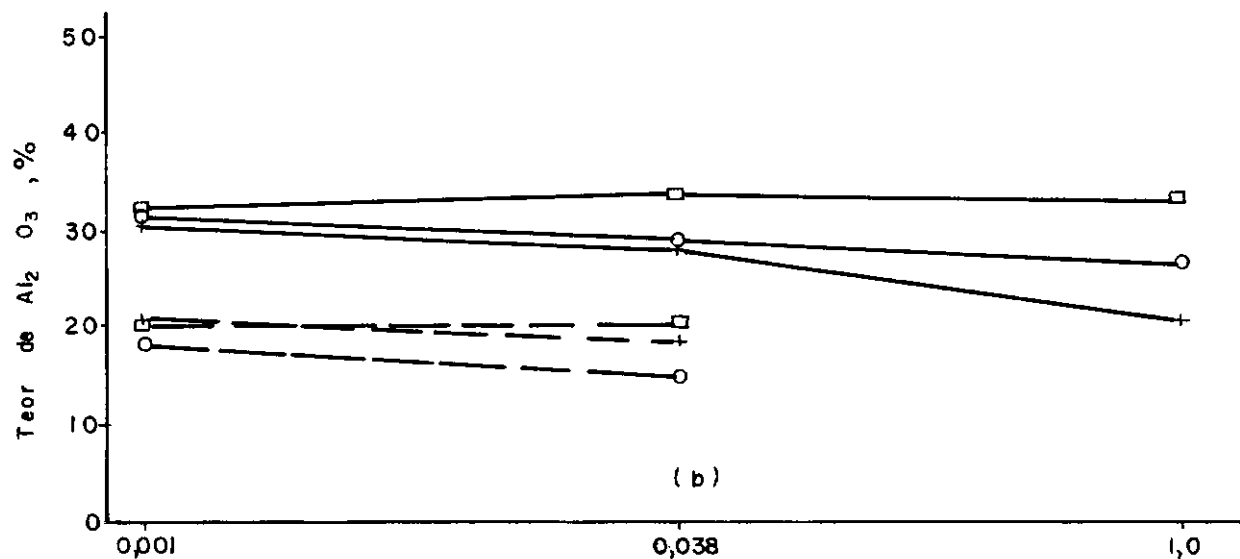
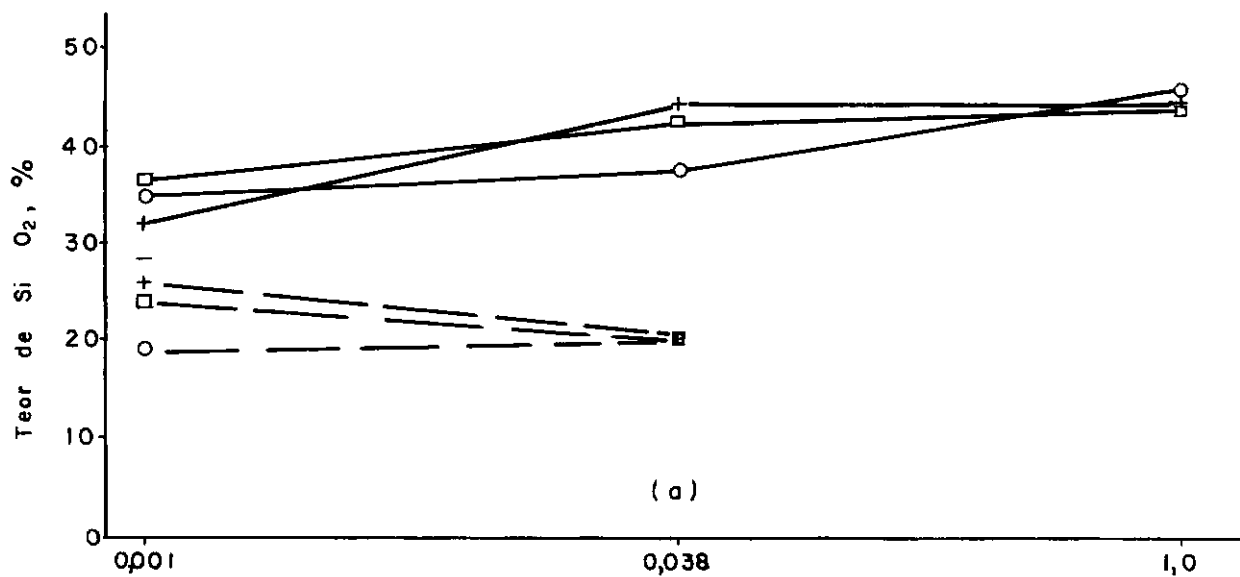
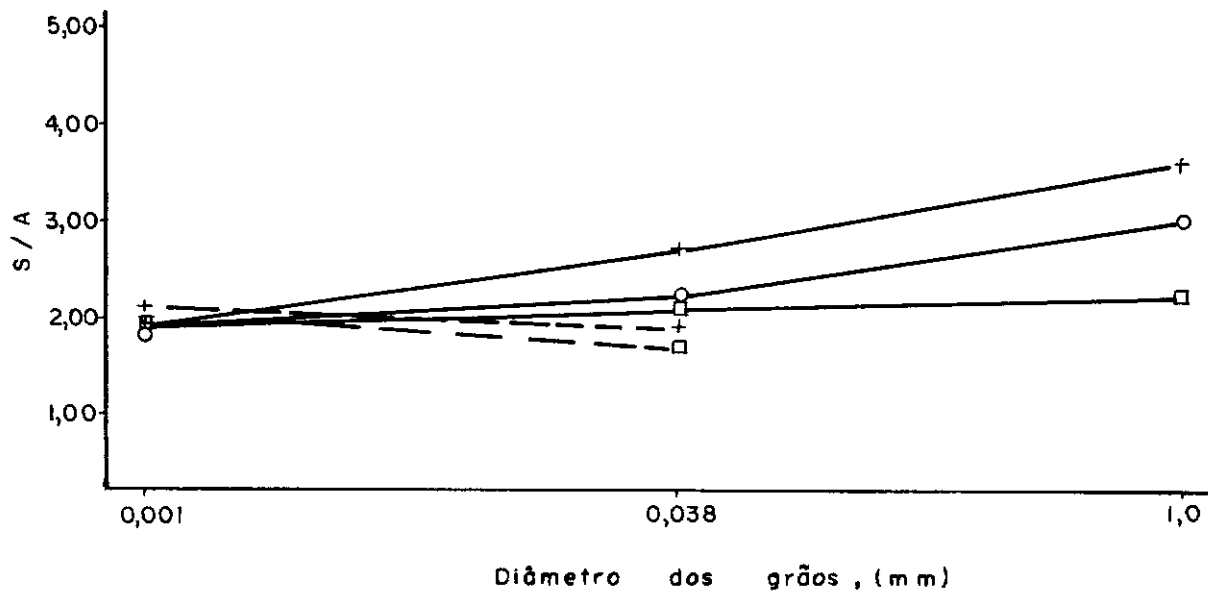
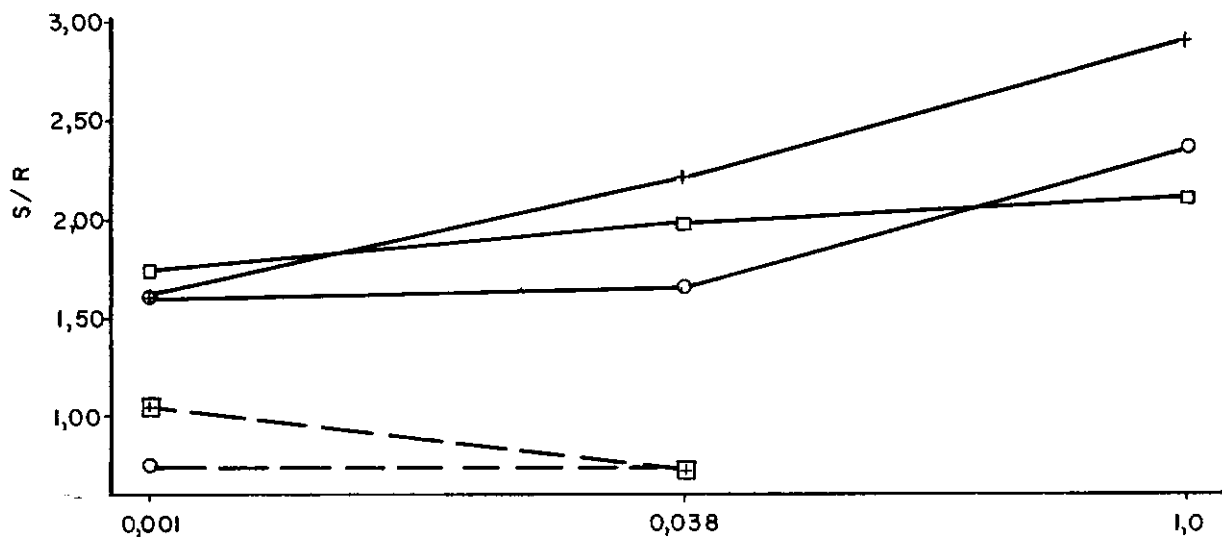


Figura 7.5a. Variação da relação sílica/sesquióxidos (S/R) nas subfrações da fração "Solo" e da fração "Concreção" da jazida Sapé-Mari.

Legenda

- + Amostra 51 a 55
- Amostra 61 a 65
- Amostra 71 a 75
- Solo
- Concreção

Figura 7.5b. Variação da relação sílica/alumina (S/A) nas subfrações da fração "Solo" e da fração "Concreção" da jazida Sapé-Mari.



As Tabelas 7.1, 7.2 e 7.3 mostram o resumo dos valores numéricos de todas as relações apresentadas neste subcapítulo.

7.3. Análise Térmica

Como indicado no Capítulo anterior, duas análises térmicas diretas foram realizadas: Análise Térmica Diferencial e Análise Termogravimétrica, ao passo que uma análise derivativa termogravimétrica foi determinada por cálculo.

7.3.1. Análise Térmica Diferencial (A.T.D.)

As curvas de A.T.D. apresentadas nas Figuras 7.6, 7.7, 7.8, 7.9, 7.10, 7.11 e 7.12 mostram claramente três picos em todas as subfrações estudadas. Estes são:

- a) 100°C - 110°C . Um pico endotérmico correspondente à perda de umidade igroscópica do material.
- b) 550°C - 570°C . Um pico endotérmico correspondente à perda d'água estrutural da caulinita.
- c) 945°C . Um pico exotérmico correspondente à formação de mulita, isto é, recristalização da alumina.

Dois outros picos endotérmicos, que são menos localizáveis, estão também presentes:

- a) Entre 150°C - 200°C existe um pico endotérmico que ocorre em algumas amostras e, quando ocorre em temperatura inferior (150°C), ele se mistura com a endotérmica correspondente, à perda de umidade igroscópica (105°C), dando como consequência um amplo pico endotérmico (por exemplo na Figura 7.8 a curva da subfra

ção 30]; mas quando ocorre a maiores temperaturas (200°C) pode ser visto em destaque (Figura 7.7 subfração 21). Este pico é provavelmente devido aos materiais amorfos presentes.

- b) Um pico exotérmico distinto entre 320°C - 360°C correspondendo à perda de água da goetita e sua transformação em hematita está geralmente presente nas amostras das concreções, por exemplo nas Figuras 7.6 e 7.9 para as subfrações 15, 44 e 45.

7.3.2. Análise termogravimétrica e diferencial termogravimétrica

Podem ser observadas três mudanças de pesos significativas, conforme mostrado nas Figuras 7.13 a 7.23.

A 110°C , correspondendo à perda de umidade igroscópica;

A 320°C , correspondendo à perda de peso da água da goetita;

A 550°C , correspondendo à perda de peso da água da caulinita.

| amostra | lado | profund. (m) | diâmetro (mm) | material | SiO ₂ % | Fe ₂ O ₃ % | Al ₂ O ₃ % | R* | ** S/A | S/R |
|---------|------|-----------------|------------------|----------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------|-----------|------|
| 10 | + | 1,00 | 9,5-2,0 | Solo | 35,0 | 32,4 | 18,4 | 3,86 | 3,17 | 1,51 |
| 11 | + | 1,00 | 2,0-76μ | Solo | 47,5 | 15,2 | 22,2 | 3,13 | 3,64 | 2,53 |
| 12 | + | 1,00 | 76μ-2μ | Solo | 46,4 | 10,2 | 27,4 | 3,32 | 2,88 | 2,32 |
| 13 | + | 1,00 | <2μ | Solo | 32,5 | 7,5 | 32,1 | 3,62 | 1,72 | 1,50 |
| 14 | + | 1,00 | 76μ-2μ | Conc. | 26,0 | 49,7 | 16,0 | 4,67 | 2,76 | 0,93 |
| 15 | + | 1,00 | <2μ | Conc. | 39,0 | 11,0 | 28,5 | 3,48 | 2,33 | 1,87 |
| 20 | + | 2,00 | 9,5-2,0 | Solo | 40,0 | 11,0 | 30,0 | 3,63 | 2,43 | 1,84 |
| 21 | + | 2,00 | 2,0-76μ | Solo | 40,0 | 8,0 | 32,0 | 3,64 | 2,12 | 1,83 |
| 22 | + | 2,00 | 76μ-2μ | Solo | 44,0 | 9,0 | 28,0 | 3,31 | 2,67 | 2,22 |
| 23 | + | 2,00 | <2μ | Solo | 21,0 | 6,3 | 19,0 | 2,26 | 1,88 | 1,55 |
| 24 | + | 2,00 | 76μ-2μ | Conc. | 40,4 | 32,2 | 15,0 | 3,48 | 4,58 | 1,93 |
| 25 | + | 2,00 | <2μ | Conc. | 34,0 | 10,7 | 28,0 | 3,41 | 2,07 | 1,66 |
| 30 | ++ | 2,00 | 9,5-2,0 | Solo | 36,0 | 25,8 | 20,2 | 3,59 | 3,03 | 1,67 |
| 31 | ++ | 2,00 | 2,0-76μ | Solo | 43,0 | 15,4 | 24,6 | 3,38 | 2,97 | 2,12 |
| 32 | ++ | 2,00 | 76μ-2μ | Solo | 47,0 | 11,8 | 23,5 | 3,04 | 3,40 | 2,57 |
| 33 | ++ | 2,00 | <2μ | Solo | 30,4 | 8,6 | 26,0 | 3,08 | 1,99 | 1,64 |
| 34 | ++ | 2,00 | 76μ-2μ | Conc. | 32,0 | 44,3 | 12,8 | 4,02 | 4,27 | 1,33 |
| 35 | ++ | 2,00 | <2μ | Conc. | 30,4 | 28,4 | 23,2 | 4,05 | 2,23 | 1,25 |

+ Lado esquerdo, ++ Lado direito

$$R = \frac{Al_2O_3}{102} + \frac{Fe_2O_3}{160}, \quad A = \frac{Al_2O_3}{102}, \quad S = \frac{SiO_2}{60}$$

Tabela 7.1 Valores numéricos dos teores de Sílica, Alumina e Ferro, e relações moleculares Sílica/Alumina e Sílica/Sesquióxidos para todas as subfrações do material da jazida Cuité.

| amostra | lado | profund. (m) | diâmetro (mm) | material | SiO ₂ % | Fe ₂ O ₃ % | Al ₂ O ₃ % | R* % | **S/A | S R |
|---------|------|-----------------|------------------|----------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------|-------|--------|
| 40 | + | 1,20 | 9,5-2,0 | Solo | 34,0 | 15,0 | 28,5 | 3,73 | 2,03 | 1,52 |
| 41 | + | 1,20 | 2,0-76μ | Solo | 40,0 | 8,5 | 32,5 | 3,72 | 2,09 | 1,79 |
| 42 | + | 1,20 | 76μ-2μ | Solo | 42,0 | 10,0 | 28,0 | 3,37 | 2,55 | 2,08 |
| 43 | + | 1,20 | <2μ | Solo | 28,0 | 7,0 | 27,0 | 3,08 | 1,76 | 1,51 |
| 44 | + | 1,20 | 76μ-2μ | Conc. | 20,0 | 52,7 | 12,3 | 4,50 | 2,76 | 0,74 |
| 45 | + | 1,20 | <2μ | Conc. | 22,0 | 29,5 | 21,7 | 4,00 | 1,72 | 0,92 |

+ Centro

$$R = \frac{Al_2O_3}{102} + \frac{Fe_2O_3}{160}, \quad **A = \frac{Al_2O_3}{102}, \quad S = \frac{SiO_2}{60}$$

Tabela 7.2 - Valores numérico dos teores de sílica, Alumínio e Ferro, e relações moleculares sílica/alumina e sílica/sesquióxidos para todas as subfrações do material da jazida Nova Floresta.

| amostra | lado | profund. (m) | diâmetro (mm) | material | SiO ₂ % | Fe ₂ O ₃ % | Al ₂ O ₃ % | R* | **S/A | S R |
|---------|------|-----------------|------------------|----------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|------|-------|--------|
| 50 | + | 2,00 | 9,5-20 | Solo | Não ficou material com 2mm após lavagem | | | | | |
| 51 | + | 2,00 | 2,0-76μ | Solo | 44,0 | 8,0 | 20,5 | 2,51 | 3,64 | 2,92 |
| 52 | + | 2,00 | 76μ-2μ | Solo | 44,0 | 9,0 | 28,0 | 3,31 | 2,67 | 2,21 |
| 53 | + | 2,00 | <2μ | Solo | 32,0 | 8,3 | 28,7 | 3,33 | 1,90 | 1,60 |
| 54 | + | 2,00 | 76μ-2μ | Conc. | 20,0 | 45,5 | 18,0 | 4,61 | 1,89 | 0,72 |
| 55 | + | 2,00 | <2μ | Conc. | 25,8 | 31,0 | 21,0 | 4,00 | 2,09 | 1,08 |
| 60 | + | 3,00 | 9,5-2,0 | | Não ficou material com 2mm após lavagem | | | | | |
| 61 | + | 3,00 | 2,0-76μ | Solo | 43,5 | 3,5 | 33,1 | 3,46 | 2,24 | 2,10 |
| 62 | + | 3,00 | 76μ-2μ | Solo | 41,8 | 5,0 | 33,1 | 3,56 | 2,15 | 1,96 |
| 63 | + | 3,00 | <2μ | Solo | 36,0 | 5,0 | 32,1 | 3,46 | 1,90 | 1,73 |
| 64 | + | 3,00 | 76μ-2μ | Conc. | 20,0 | 42,0 | 20,0 | 4,59 | 1,70 | 0,73 |
| 65 | + | 3,00 | <2μ | Conc. | 24,0 | 28,6 | 20,3 | 3,77 | 2,01 | 1,06 |
| 70 | + | 4,00 | 9,5-2,0 | Solo | Não ficou material com 2mm após lavagem | | | | | |
| 71 | + | 4,00 | 2,0-76μ | Solo | 45,0 | 10,2 | 26,0 | 3,18 | 2,95 | 2,36 |
| 72 | + | 4,00 | 76μ-2μ | Solo | 36,8 | 14,8 | 28,5 | 3,72 | 2,20 | 1,65 |
| 73 | + | 4,00 | <2μ | Solo | 35,1 | 10,7 | 30,7 | 3,68 | 1,94 | 1,59 |
| 74 | + | 4,00 | 76μ-2μ | Conc. | 20,0 | 48,5 | 15,2 | 4,52 | 2,24 | 0,74 |
| 75 | + | 4,00 | <2μ | Conc. | 19,0 | 39,7 | 18,0 | 4,25 | 1,80 | 0,75 |

+ Centro

$$*_R = \frac{Al_2O_3}{102} + \frac{Fe_2O_3}{160}, \quad **_A = \frac{Al_2O_3}{102}, \quad S = \frac{SiO_2}{60}$$

Tabela 7.3 Valores numéricos dos teores de Sílica, Alumínio e Ferro, e relações moleculares sílica/alumina e sílica/sesquióxidos para todas as subfrações do material da jazida Sapé-Mari.

7.4. Difração de Raios-X

As amostras resultantes das várias subfrações foram primeiramente submetidas à difração de raios-X nos laboratórios da SUDENE. Os difratogramas são apresentados no Apêndice C nas figuras C.1 a C.14.

A análise destes resultados mostrou que o único argilo mineral presente em todas as subfrações é caulinita com diverso grau de desordem, e a presença de quartzo em todas as subfrações com diâmetro superior a 2μ . Por outro lado, ao contrário do que foi evidenciado na análise química e na análise térmica (diferencial e gravimétrica) a goetita e a hematita não foram detectadas na análise de raios-X, referidas anteriormente, dentro das condições de ensaio adotadas, motivando desta maneira uma decisão por uma repetição parcial da análise. Desta feita, as frações correspondentes às concreções e solos retidos na malha de 2,0mm foram selecionadas e encaminhadas ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Leeds, Inglaterra, com a finalidade de se dissipar a incoerência. Os gráficos, provenientes da repetição da análise de raios-X com provam a existência da goetita e da hematita em todas as amostras ensaiadas, conforme se verifica nas figuras 7.24 a 7.28 apresentadas a seguir.

7.5. Microscopia Electrônica de Varredura

Para o estudo qualitativo de microscopia electrônica de varredura utilizou-se a fração concreção e uma subfração da fração solo. Esta foi a correspondente ao tamanho entre 9,5mm e 2,0mm. Na fração concreção se observaram superfícies obtidas por fraturamente; no entanto, para a subfração do solo se observaram superfícies naturais. A técnica de preparação dos espécimes é apresentada no Apêndice D.

A informação obtida deste estudo é apresentada nas Figuras 7.29a a 7.38b. As legendas correspondentes a cada Figura descrevem os aspectos qualitativos de mais importância observados.

De um modo geral, pode-se dizer que todos os espécimes observados apresentaram um alto grau de porosidade. Para todos os espécimes se observou certo grau de cimentação, mais acentuado nos arredores dos vazios. Dois aspectos que parecem de importância, podem ser ainda desenvolvidos: um com referência às características da fase sólida (solo ou concreção), e outro com referência aos vazios. Trataremos destes a seguir.

7.5.1. Fase sólido

Em geral, a microestrutura e arranjo geométrico do argilo-mineral caulinite (detectado pelos estudos de ATD, TG e Raios-X) não podem visualizar-se claramente devido à cobertura contínua de material amorfo proveniente dos óxidos de ferro amorfo e sílica amorfa. No entanto, as partículas de quartzo são claramente vistas, isto porque o quartzo que tem uma atividade superficial desprezível, não permite fixação dos óxidos amorfos na superfície. Os agregados argila-material amorfo não apresentam formas geométricas definidas nem arranjos geométricos identificáveis. As partículas de quartzo estão distribuídas aleatoriamente na matriz contínua formada pelo argilo-mineral e material amorfo, claramente a ligação superfície de quartzo-matriz é muito fraca, sendo que as partículas de quartzo podem ser desalojadas facilmente. Isto ocorreu durante

o processo de preparação, tanto que em várias Figuras pode-se ver os buracos onde as partículas de quartzo estavam originalmente presentes. As características observadas nas próprias partículas de quartzo mostram que elas têm superfície lisas com planos bem formados. Desde que estes solos são de natureza residual, a remoção do quartzo em solução tem acontecido um número de vezes considerável.

7.5.2. Fases Vazios

Vazios de diâmetros variáveis desde 500µ de diâmetro a 1µ de diâmetro foram observados. Ainda não se encontrou nenhuma ordem de arranjo entre eles. A característica mais notável dos vazios destes materiais é que suas superfícies interiores estão cobertas por material amorfo. A presença deste é provavelmente devido à deposição dos elementos em solução na água fluindo através deles. Esta deposição pode ser atribuída aos incrementos de sucção e tensão superficial nos vazios.

7.6. Área Específica

Os valores determinados para as áreas específicas correspondentes às amostras são apresentados na tabela 7.4.

Algumas tendências podem ser observadas. Diferentemente do esperado, os valores encontrados para o material do tamanho silte são apenas ligeiramente inferiores ao do tamanho argila e mesmo maiores do que estes para alguns espécimes. Não existem diferenças consistentes entre as amostras dos solos e as das concreções.

Tanto para os solos como para as concreções, as amostras do tamanho silte mostram valores inusitadamente altos quando comparados com os valores das amostras do tamanho argila.

| amostra Nº | diâmetro, mm | área especí- fica, m ² /g. | amostra Nº | diâmetro mm | área especí- fica, m ² /g. |
|---------------|-----------------|--|---------------|----------------|--|
| 12 | 76µ- 2µ | 15,19 | 44 | 76µ- 2µ | 13,85 |
| 13 | <2µ | 16,89 | 45 | <2µ | 8,33 |
| 14 | 76µ- 2µ | 14,60 | 52 | 76µ - 2µ | 9,86 |
| 15 | <2µ | 19,42 | 53 | <2µ | 15,31 |
| 22 | 76µ - 2µ | - | 54 | 76µ - 2µ | 7,22 |
| 23 | <2µ | 20,00 | 55 | <2µ | 9,50 |
| 24 | 76µ - 2µ | 16,90 | 62 | 76µ - 2µ | 14,55 |
| 25 | <2µ | 8,86 | 63 | <2µ | 13,14 |
| 32 | 76µ - 2µ | 14,22 | 64 | 76µ - 2µ | 21,65 |
| 33 | <2µ | 18,95 | 65 | <2µ | 19,48 |
| 34 | 76µ - 2µ | 12,44 | 72 | 76µ - 2µ | 7,65 |
| 35 | <2µ | 15,08 | 73 | <2µ | 15,43 |
| 42 | 76µ - 2µ | 15,66 | 74 | 76µ - 2µ | 21,24 |
| 43 | <2µ | 18,19 | 75 | <2µ | 29,63 |

Tabela 7.4 Áreas específicas das subfrações com diâmetro maior e menor que 2µ para materias das três jazidas.

7.7. Propriedades de Engenharia

Os resultados aqui apresentados são essencialmente aqueles provenientes de um grupo de pesquisa, sobre solos lateríticos, desenvolvidos no Centro de Ciências e Tecnologia da UFPb, sob a orientação do Professor Cabrera, envolvendo os materiais das jazidas Cuité, Nova Floresta e Sapé-Mari.

Os valores correspondentes às propriedades Físicas, Compactação e Resistência, foram obtidos dos trabalhos de Marinho (76) Ferro(77) Bezerra (78) e Borba (79) conforme apresentados nas tabelas 7.5, 7.6, 7.7 e 7.8.

| Aditivo | Solo | Cal Calcítica | | | Cal Dolomítica | | | Cimento | | |
|--|--------|---------------|--------|--------|----------------|--------|--------|---------|-----|------|
| Porcentagem | Puro | 1 | 2 | 5 | 1 | 2 | 5 | 5,0 | 7,5 | 10 |
| Propriedades Físicas | | | | | | | | | | |
| Densidade real | 2,85 | | | | | | | | | |
| Limite de liquidez, % | 22,00 | 18,85 | 17,30 | 16,00 | 19,50 | 18,25 | 16,75 | | | |
| Limite de Plasticidade, % | 16,20 | 14,35 | 13,51 | 12,77 | 14,72 | 14,16 | 12,91 | | | |
| Índice de Plasticidade, % | 5,80 | 4,50 | 3,79 | 3,23 | 4,78 | 4,09 | 3,84 | | | |
| Compactação | | | | | | | | | | |
| Umidade ótima % | 10,30 | - | 10,80 | 11,30 | - | 11,50 | 12,00 | | | |
| Peso específico aparente seco máximo Kg/m ³ | 21,35 | - | 21,30 | 21,20 | - | 20,90 | 20,60 | | | |
| Resistência | | | | | | | | | | |
| C.B.R. sem cura e imersão % | 77,09 | - | 145,02 | 131,62 | - | 110,70 | 198,54 | | | |
| C.B.R. com cura e imersão % | 66,09 | - | 163,91 | 127,88 | - | 28,97 | 100,00 | | | |
| Penetração do Cone com cura e imersão, Kgf/cm ² | 34,77 | - | 231,18 | 220,71 | - | 35,36 | 112,24 | | | |
| Penetração do Cone sem cu ra e imersão, Kgf/cm ² | 119,79 | - | 170,06 | 174,43 | - | 139,40 | 152,27 | | | |
| Resistência à compressão simples após 7 dias de cu ra, Kgf/cm ² | - | - | - | - | - | - | - | 4,0 | 6,0 | 10,0 |

Tabela 7.5. Propriedades de engenharia do solo da jazida Cuité. (76, 77, 78).

| Aditivo | Solo | Cal | Calcita | Cal dolomítica | | | Cimento | | |
|---|--------|-------|---------|----------------|-------|--------|---------|-----|-----------|
| Porcentagem | puro | 1 | 2 | 5 | 1 | 2 | 5 | 5 | 7,5 10 |
| Propriedades Físicas: | | | | | | | | | |
| Densidade real | 3,08 | | | | | | | | |
| Límite de liquidez % | 27,18 | 24,00 | 22,30 | 20,50 | 24,25 | 22,50 | 21,00 | | |
| Límite de Plasticidade % | 18,23 | 16,37 | 15,25 | 14,19 | 16,49 | 15,39 | 14,28 | | |
| Índice de Plasticidade % | 8,87 | 7,63 | 6,31 | 7,31 | 7,76 | 7,11 | 6,72 | | |
| Compactação: | | | | | | | | | |
| Umidade ótima % | 10,30 | - | 11,50 | 11,20 | - | 11,70 | 11,60 | | |
| Peso específico aparente seco máximo Kg/m ³ | 23,10 | - | 22,50 | 22,35 | - | 22,05 | 22,45 | | |
| Resistência | | | | | | | | | |
| C.B.R. sem cura e imersão % | 100,00 | - | 145,94 | 146,58 | - | 132,22 | 151,41 | | |
| C.B.R. com cura e imersão % | 60,41 | | 115,20 | 176,00 | - | 76,19 | 125,00 | | |
| Penetração do Cone com cura e imersão, Kgf/cm ² | 57,41 | - | 186,94 | 147,81 | - | 54,63 | 84,43 | | |
| Penetração do Cone sem cura e imersão, Kgf/cm ² | 102,31 | - | 97,35 | 180,00 | - | 127,74 | 194,29 | | |
| Resistência à compressão Simples após 7 dias de cura, Kgf/cm ² | - | - | - | - | - | - | - | 5,5 | 14,3 19,6 |

Tabela 7.6. Propriedades de engenharia do solo da Jazida Nova Floresta. (76,77,78)

| Aditivo | Solo | Cal | Calcítica | Cal | Dolomítica | Cimento | | | | |
|---|--------|-------|-----------|--------|------------|---------|--------|------|------|------|
| Porcentagem | puro | 1 | 2 | 5 | 1 | 2 | 5 | 5 | 7,5 | 10 |
| Propriedades Físicas | | | | | | | | | | |
| Densidade real | 2,86 | | | | | | | | | |
| Límite de liquidez, % | 34,00 | 30,80 | 28,50 | 26,20 | 31,25 | 29,25 | 27,25 | | | |
| Límite de Plasticidade, % | 25,00 | 22,21 | 20,49 | 19,60 | 22,11 | 21,32 | 20,35 | | | |
| Índice de Plasticidade, % | 9,00 | 8,59 | 8,01 | 6,60 | 9,13 | 7,92 | 6,90 | | | |
| Compactação | | | | | | | | | | |
| Umidade ótima, % | 13,75 | - | 15,75 | 16,30 | - | 16,00 | 16,00 | | | |
| Peso específico aparente seco máximo, Kg/m ³ | 20,20 | - | 19,40 | 19,35 | - | 19,35 | 19,45 | | | |
| Resistência | | | | | | | | | | |
| C.B.R. sem cura e imersão % | 73,26 | - | 112,04 | 109,75 | - | 84,37 | 102,82 | | | |
| C.B.R. com cura e imersão % | 59,67 | - | 80,30 | 101,00 | - | 55,76 | 109,62 | | | |
| Penetração do Cone com cura e imersão Kgf/cm ² | 32,22 | - | 29,80 | 89,77 | - | 65,56 | 93,37 | | | |
| Penetração do Cone sem cura e imersão Kgf/cm ² | 107,28 | - | 147,61 | 109,07 | - | 87,21 | 100,00 | | | |
| Resistência à compressão simples, após 7 dias de cura, Kgf/cm ² | - | - | - | - | - | - | - | 16,2 | 21,7 | 32,0 |

Tabela 7.7. Propriedades de engenharia do solo da Jazida Sapê-Mari (76,77,78)

| w % | γ_s Kg/m ³ | C_{cu} Kgf/cm ² | ϕ_u Graus | C' Kgf/cm ² | ϕ' Graus |
|--------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------------|------------------|
| 15,20 | 1744 | 0,377 | 16,8 | 0,357 | 24,0 |
| 15,88 | 1912 | 0,388 | 22,4 | 0,388 | 27,0 |
| 17,18 | 1857 | 0,357 | 22,8 | 0,122 | 33,3 |
| 17,34 | 1849 | 0,224 | 28,0 | 0,102 | 34,7 |
| 18,10 | 1858 | 0,306 | 22,7 | 0,102 | 31,6 |
| 18,21 | 1857 | 0,204 | 26,5 | 0,082 | 32,6 |
| 18,48 | 1825 | 0,153 | 21,5 | 0,051 | 29,7 |
| 19,80 | 1799 | 0,073 | 19,9 | 0,122 | 28,5 |
| 20,37 | 1790 | 0,071 | 22,4 | 0,143 | 25,7 |
| 20,52 | 1809 | 0,214 | 25,3 | 0,296 | 24,1 |
| 20,59 | 1769 | 0,357 | 11,5 | 0,184 | 22,1 |

Tabela 7.8. Ensaio Triaxial Consolidade não Drenado, Solo Saturado. Jazida Sapé-Mari. (79)

Legenda

- w - Teor de umidade
- γ_s - Peso específico aparente seco
- C_{cu} - Coesão total
- ϕ_u - Angulo de atrito total
- C' - Coesão efetiva
- ϕ' - Angulo de atrito efetivo.

Figura 7.6. Curvas de Análise Térmica Diferencial (A.T.D.) para as subfrações de solo e concreção da jaz_i da Cuité. Amostra correspondente a 1m. de pro_ufundidade, lado esquerdo.

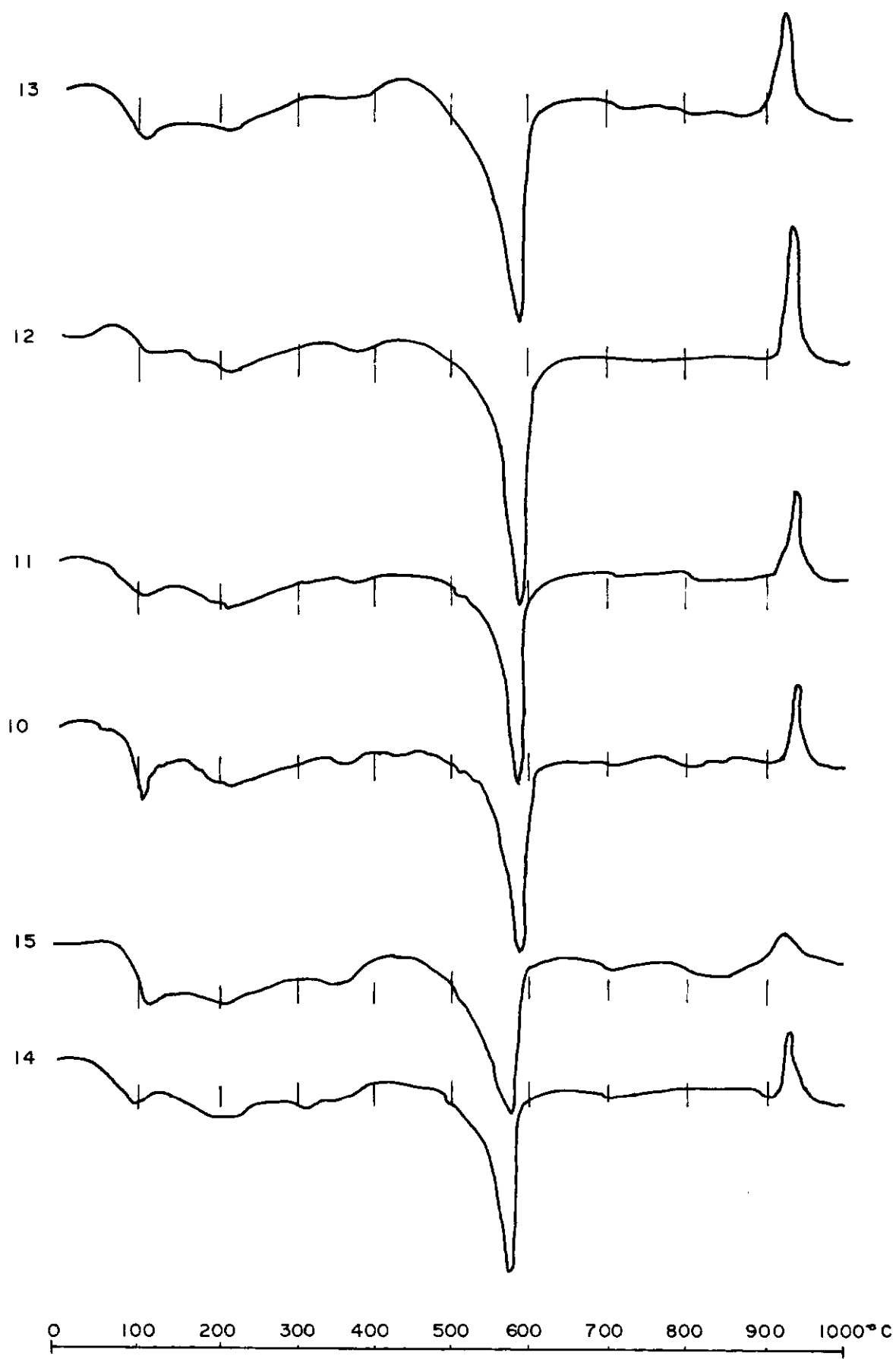


Figura 7.7. Curvas de Análise Térmica Diferencial (A.T.D.) para as subfrações de solo e concreção da jazida Cuitê. Amostra correspondente a 2m. de profundidade, lado esquerdo.

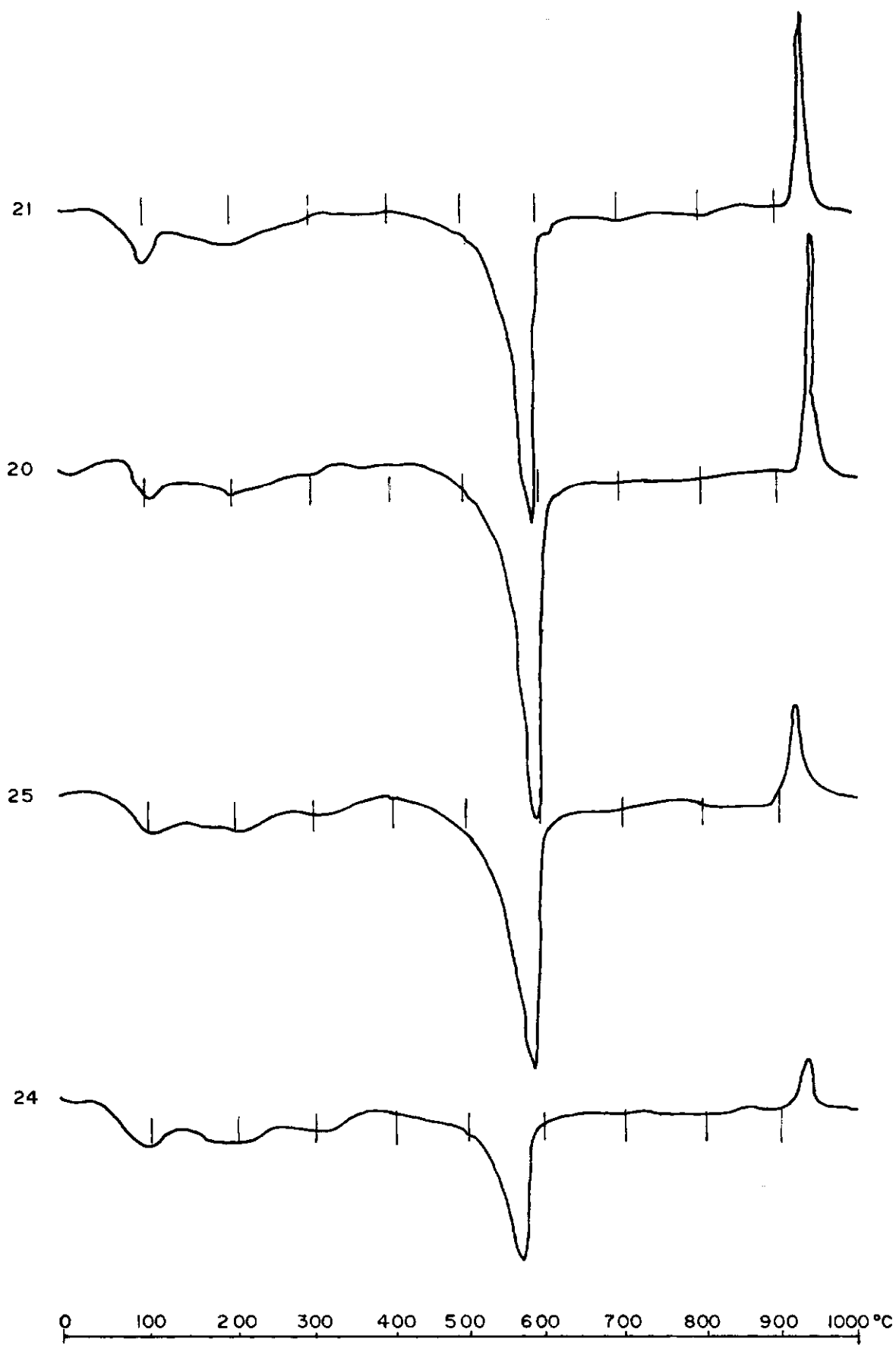
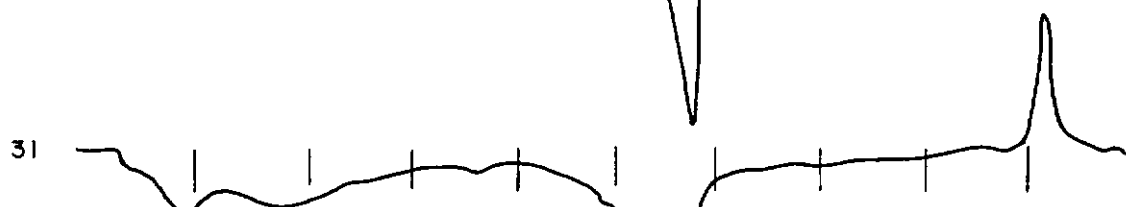


Figura 7.8. Curvas de Análise Térmica Diferencial (A.T.D.) para as subfrações de solo e concreção da jazi da Cuité. Amostra correspondente a 2m. de proufundidade, lado direito.



0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 °C

Figura 7.9. Curva de Análise Térmica Diferencial (A.T.D.) para as subfrações de solo e concreção da jazida Nova Floresta. Amostra correspondente a 1,2m de profundidade.

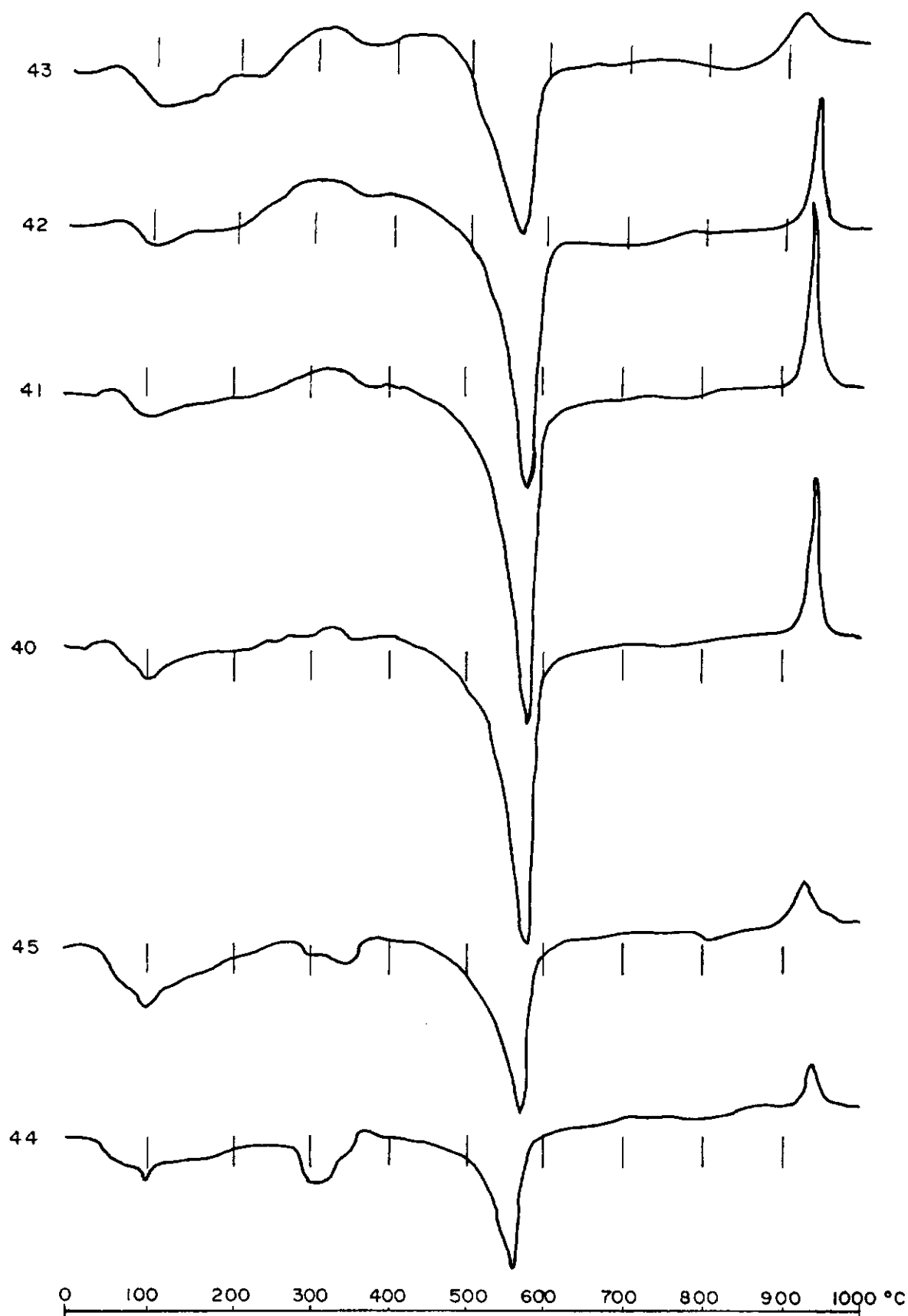


Figura 7.10. Curva de Análise Térmica Diferencial (A.T.D.) para as subfrações de solo e concreção da jazida Sapé-Mari. Amostra correspondente a 2,0m de profundidade.

53

52

51

55

54

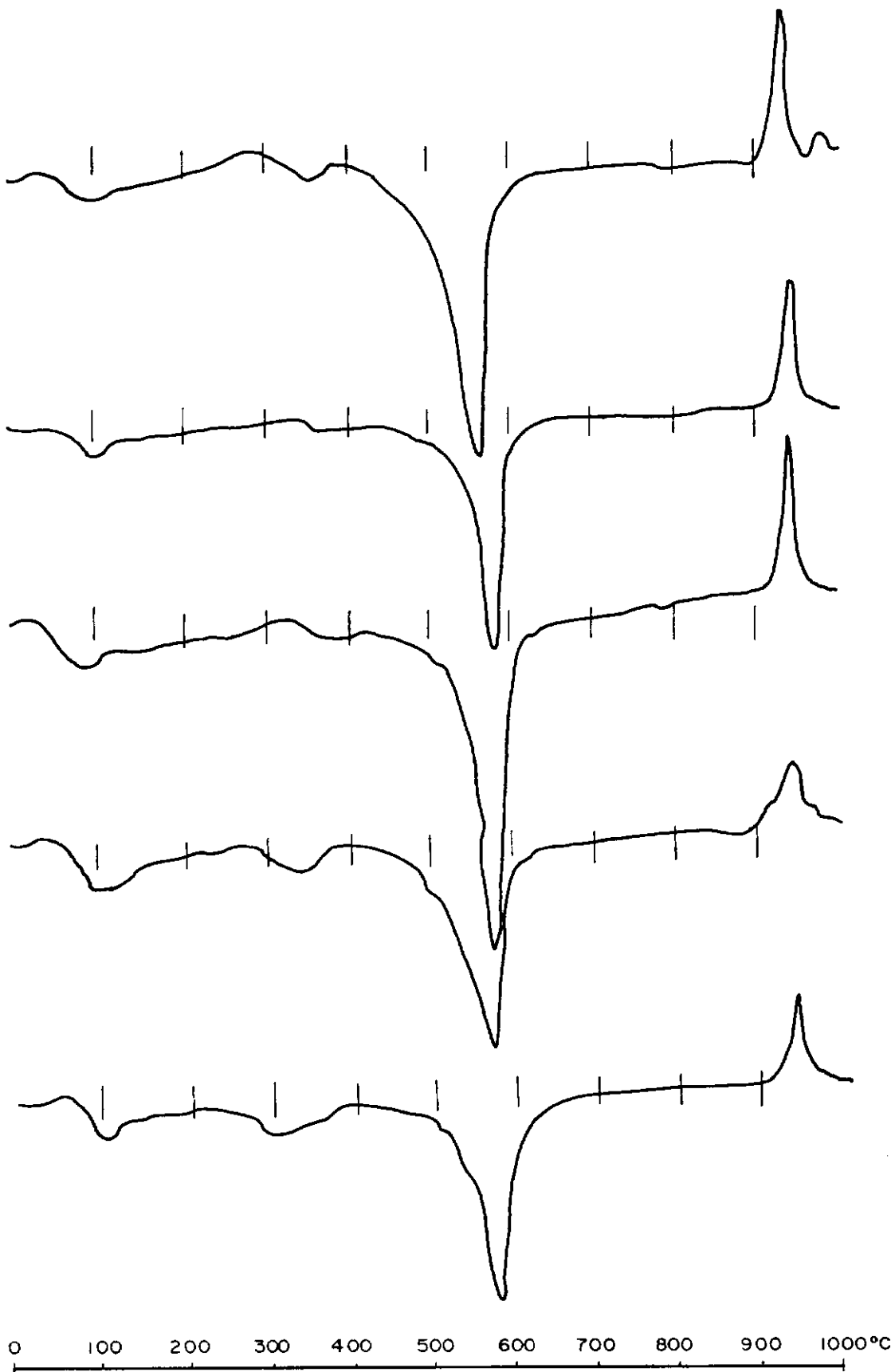


Figura 7.11. Curva de Análise Térmica Diferencial (A.T.D.) para as subfrações de solo e concreção da jazida Sapé-Mari. Amostra correspondente a 3,0m de profundidade.

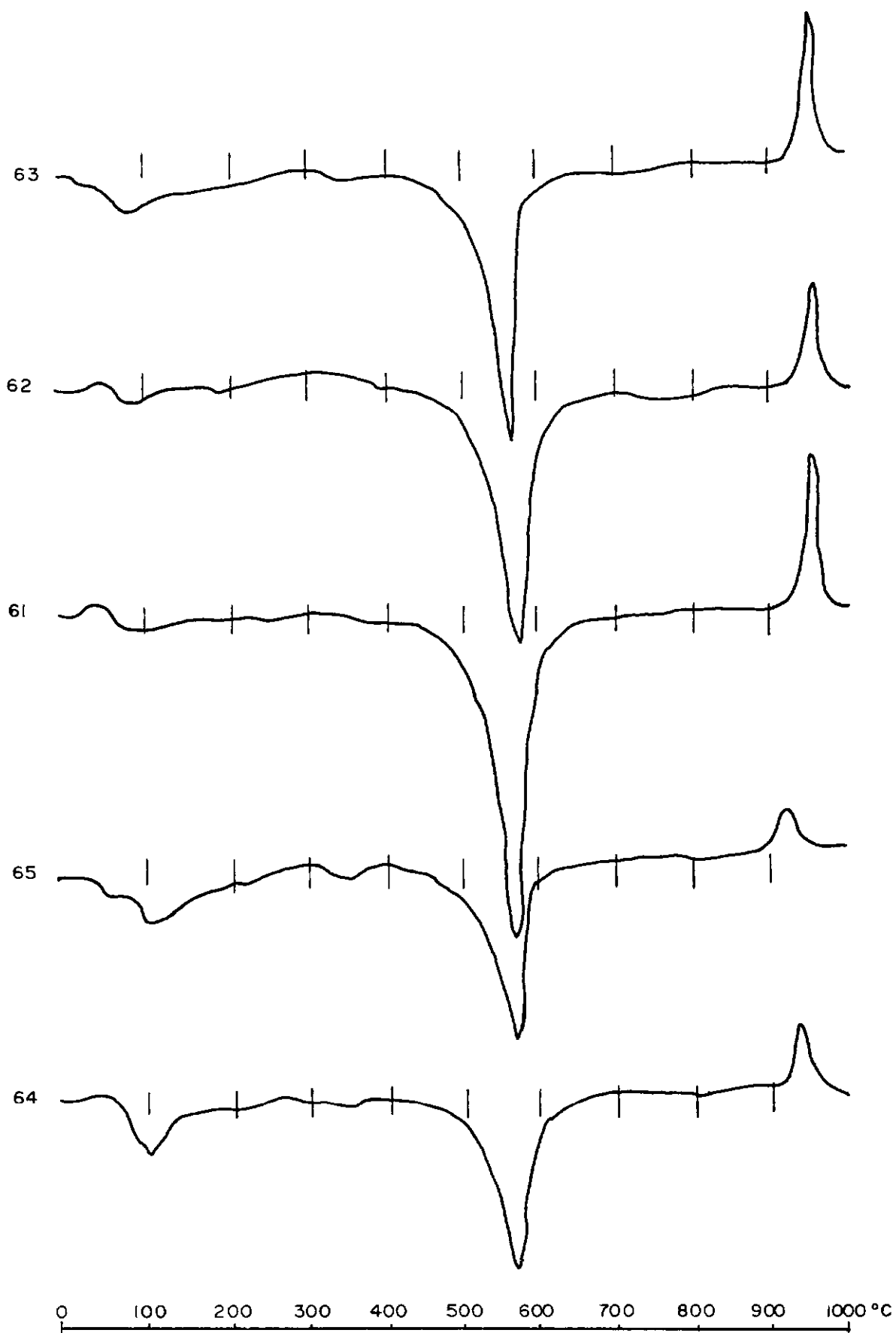


Figura 7.12. Curva de Análise Térmica Diferencial (A.T.D.) para as subfrações de solo e concreção da ja zida Sapê-Mari. Amostra correspondente a 4,0m de profundidade.

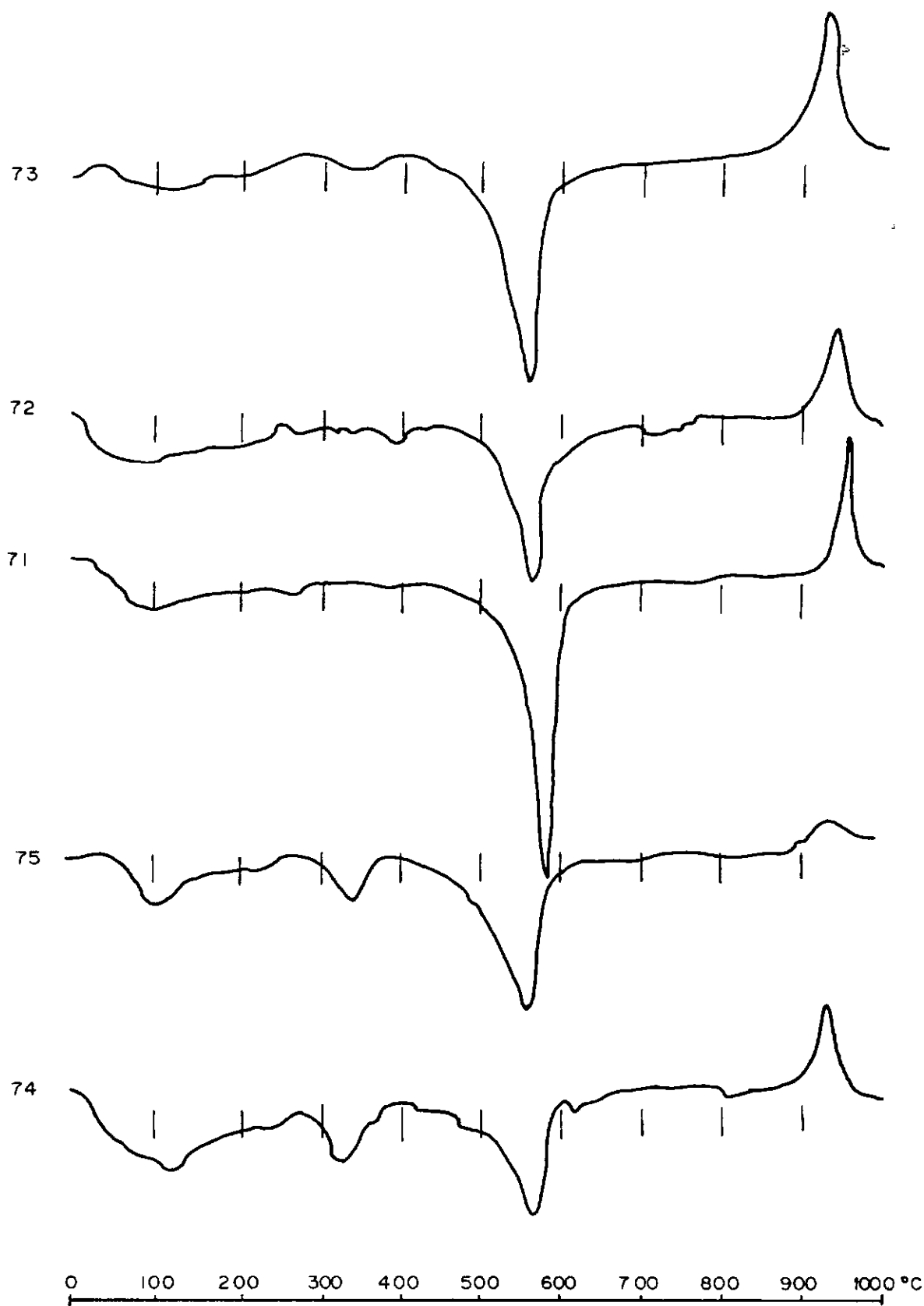


Figura 7.13. Curva de Análise Termogravimétrica (T.G.) e Diferencial Termogravimétrica (D.T.G.) para a subfração solo. Jazida Cuité, lado esquerdo, a 1m de profundidade.

TEMPERATURA °C

C - 16 = 10

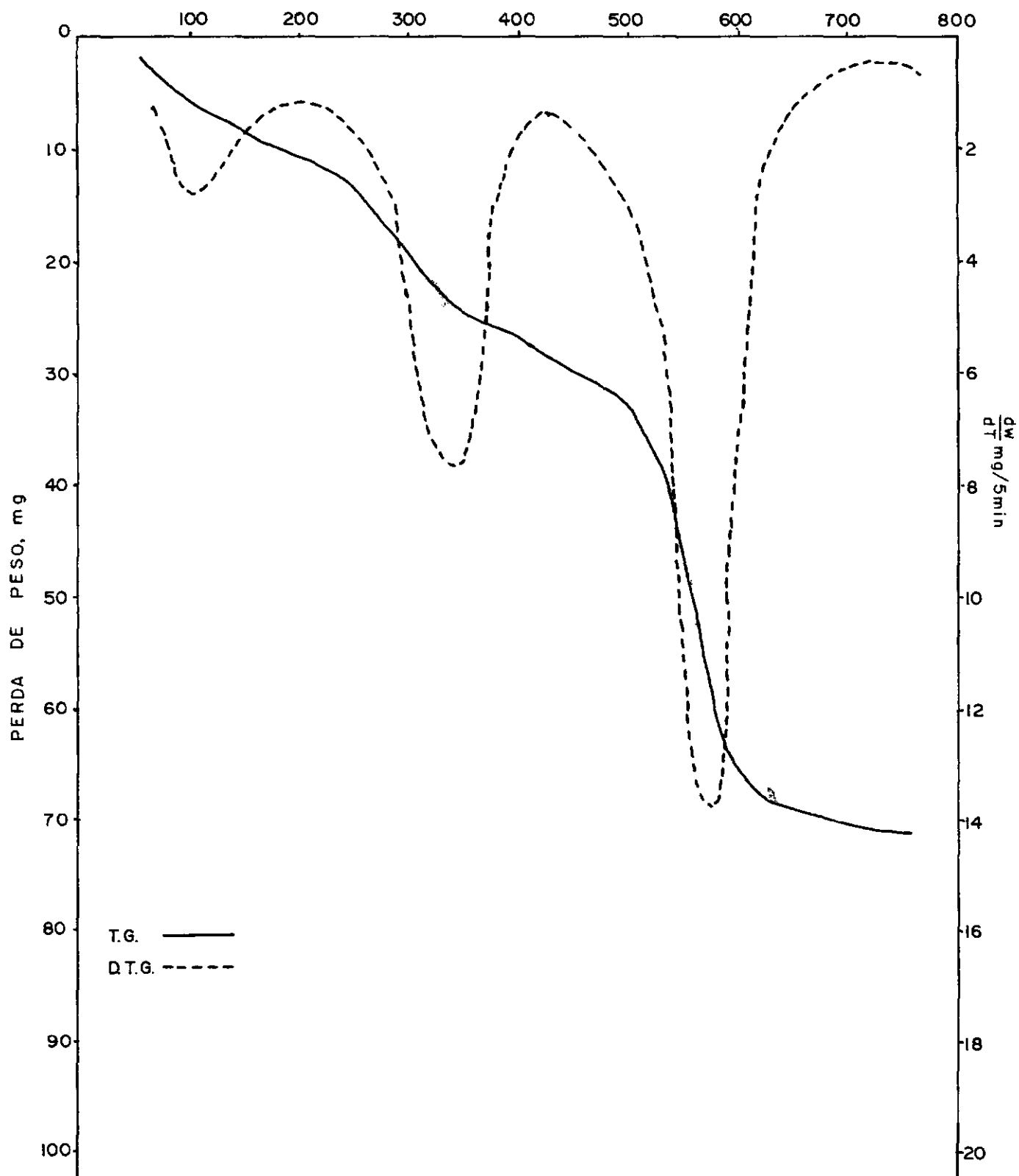


Figura 7.14. Curva de Análise Termogravimétrica (T.G.) e Diferencial Termogravimétrica (D.T.G.) para a fração concreção (sem separação de subfração). Jazida Cuité, lado esquerdo a 1 metro de profundidade.

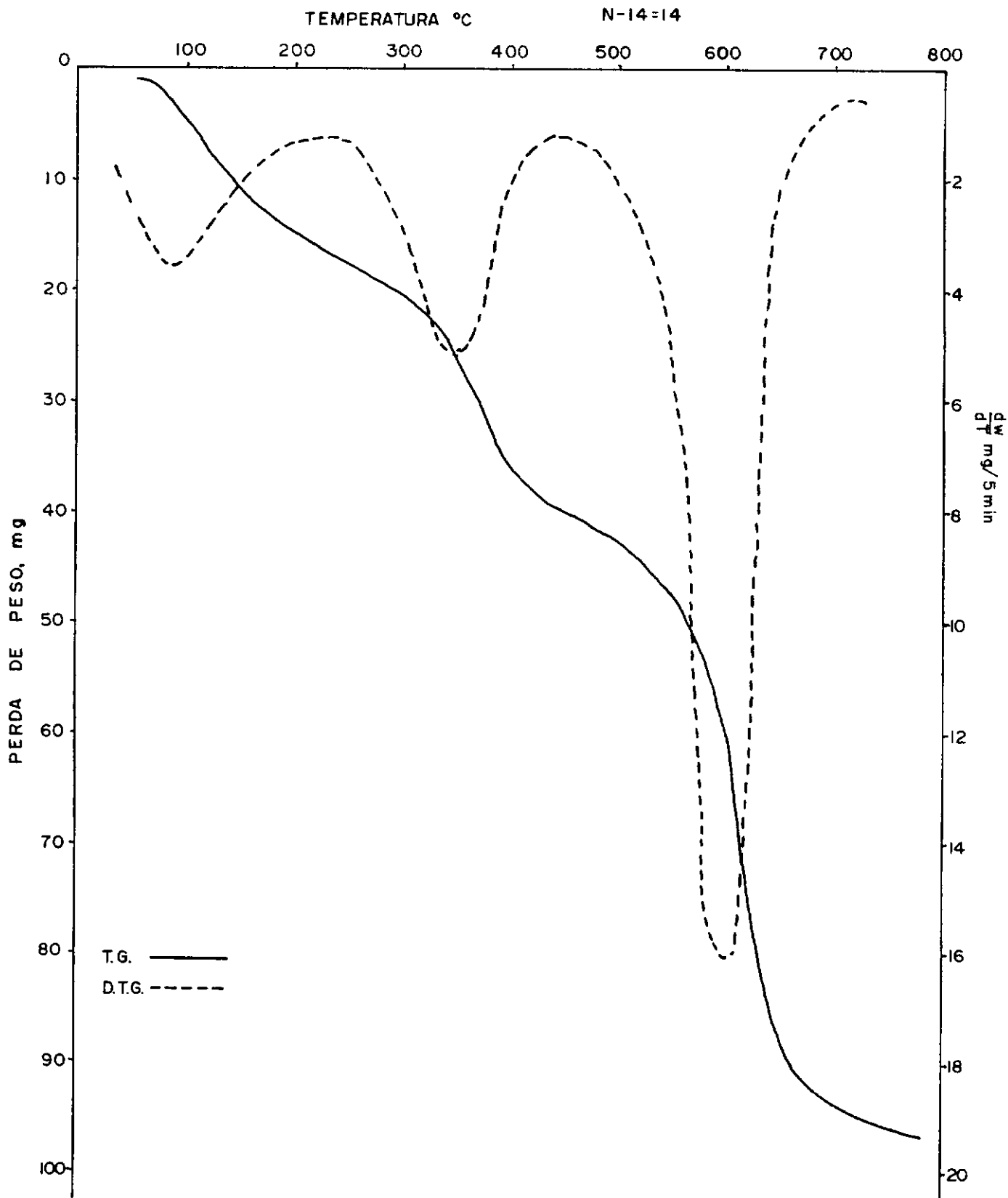


Figura 7.15. Curva de Análise Termogravimétrica (T.G.) e Diferencial Termogravimétrica (D.T.G.) para a subfração solo. Jazida Cuité, lado esquerdo a 2m de profundidade.

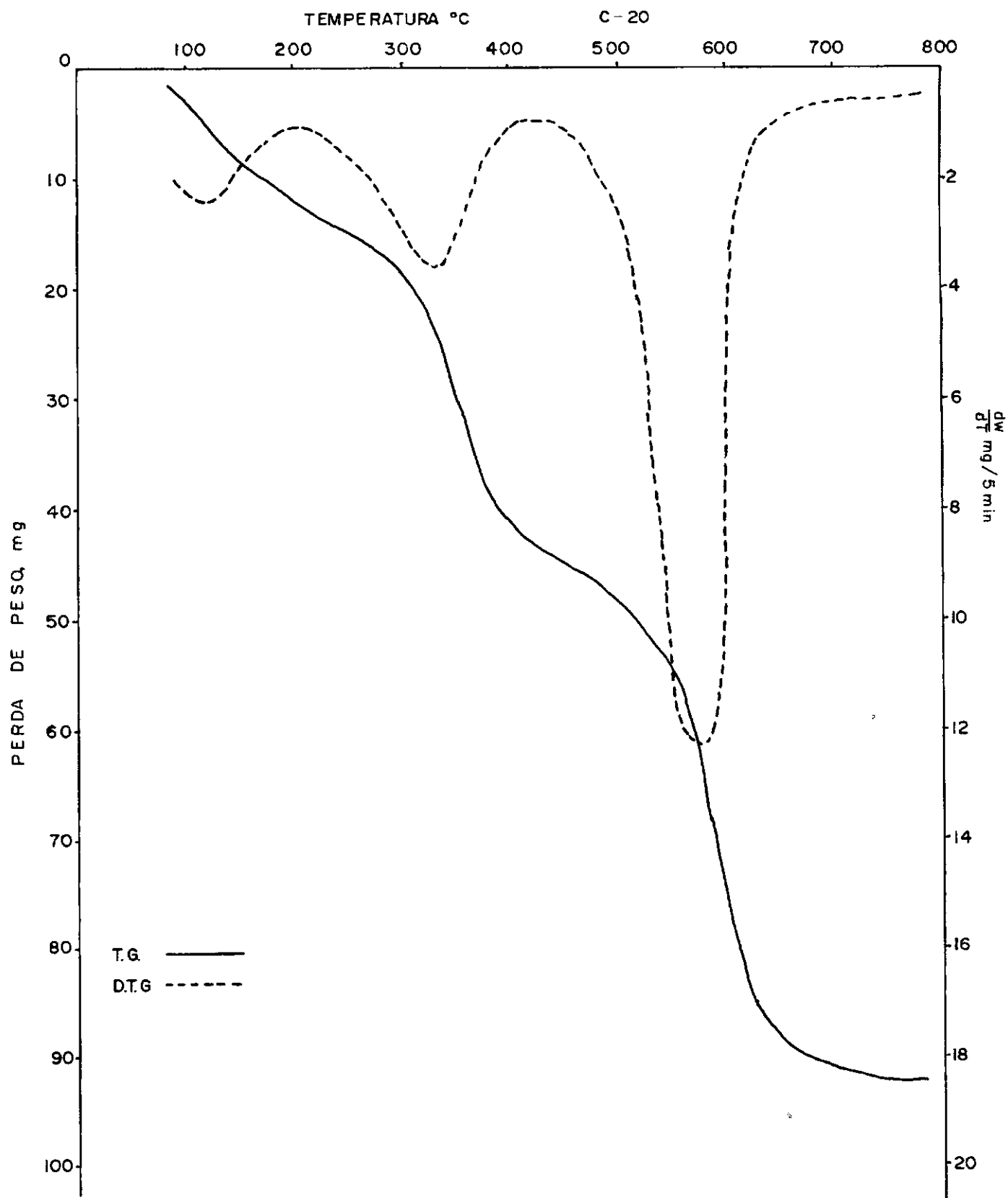


Figura 7.16. Curva de Análise Termogravimétrica (T.G.) e Diferencial Termogravimétrica (D.T.G.) para a fração concreção (sem separação de subfração). Jazida Cuité lado esquerdo a 2m de profundidade.

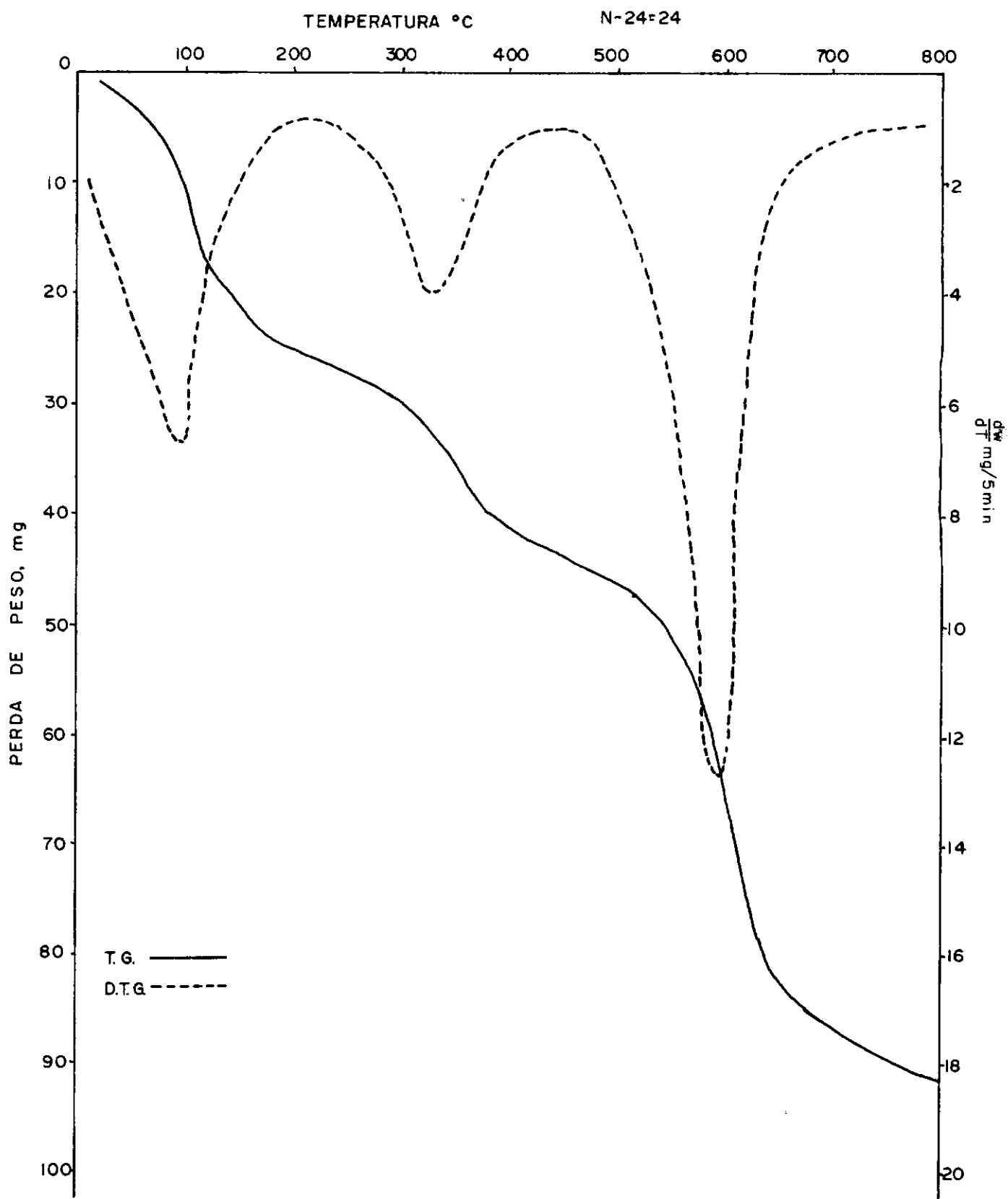


Figura 7.17. Curva de Análise Termogravimétrica (T.G.) e Diferencial Termogravimétrica (D.T.G.) para a subfração Solo. Jazida Cuité, lado direito a 2m de profundidade.

TEMPERATURA °C

N-36=30

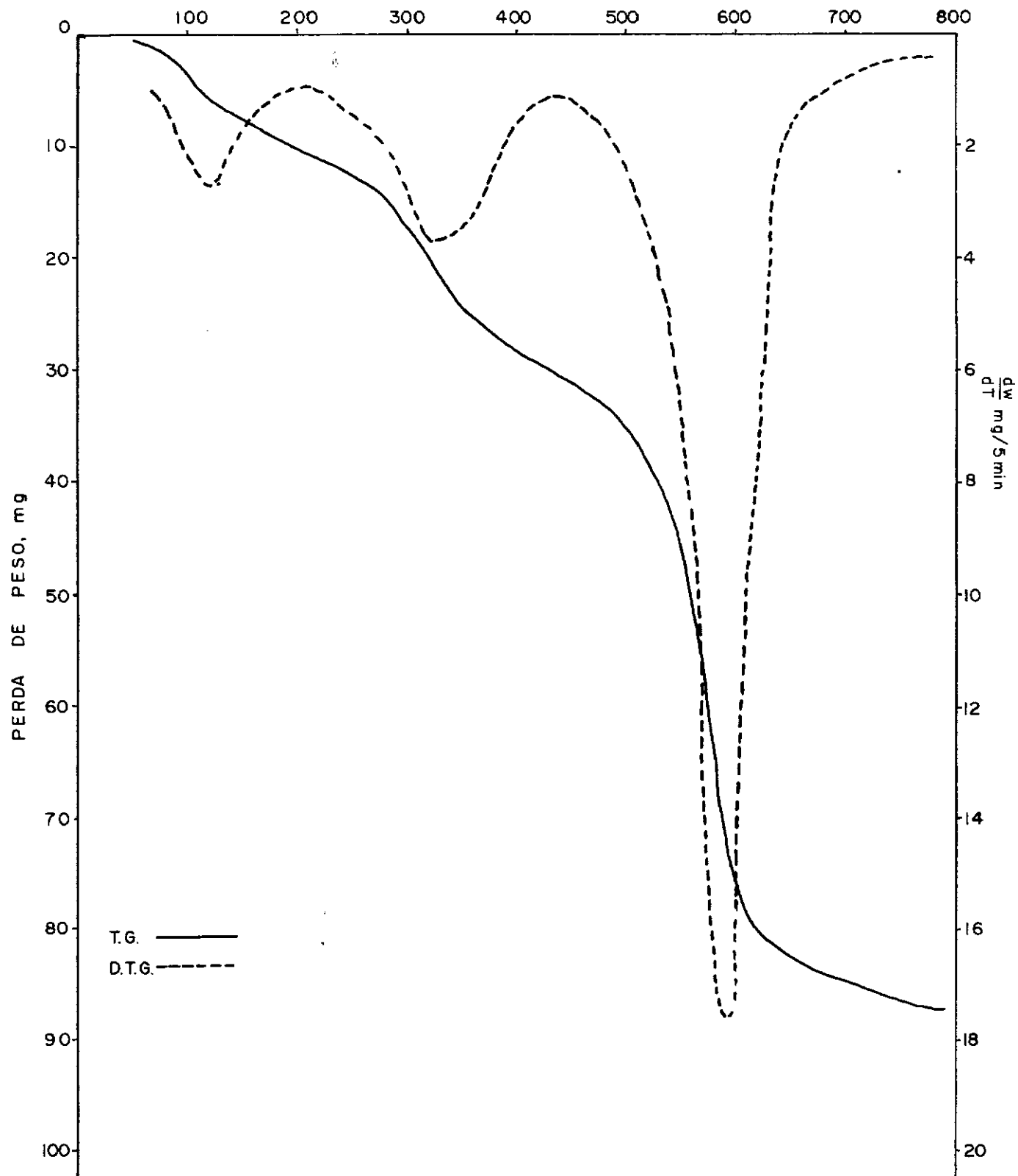


Figura 7.18. Curva de Análise Termogravimétrica (T.G.) e Diferencial Termogravimétrica (D.T.G.) para a fração Concreção (sem separação de subfração). Jazida Cuité a 2m de profundidade.

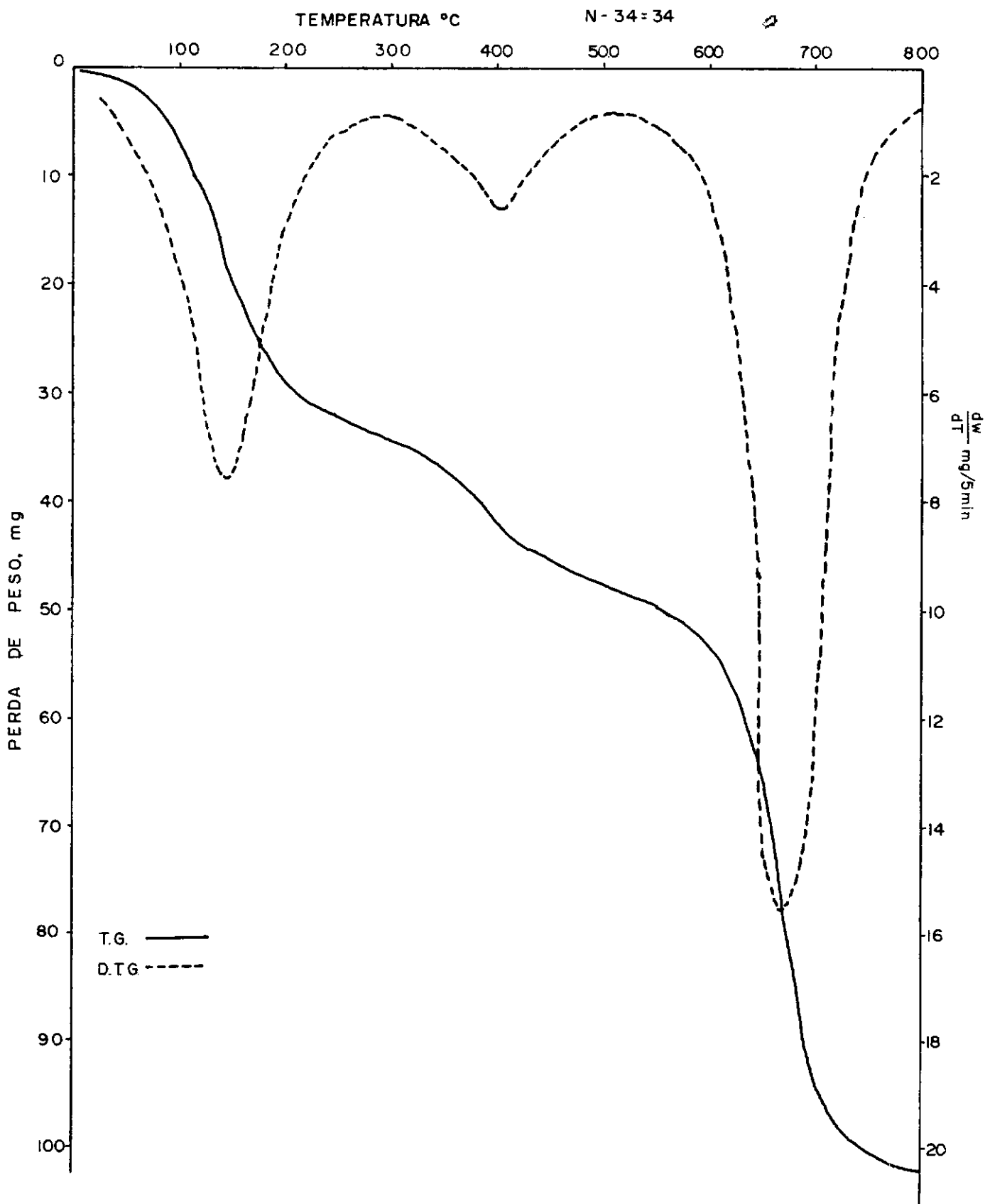


Figura 7.19.

Curva de Análise Termogravimétrica (T.G.)
e Diferencial Termogravimétrica (D.T.G.)
para a subfração Solo. Jazida Nova Flores
ta a 1,2m de profundidade.

TEMPERATURA °C

AMOSTRA - 46=40

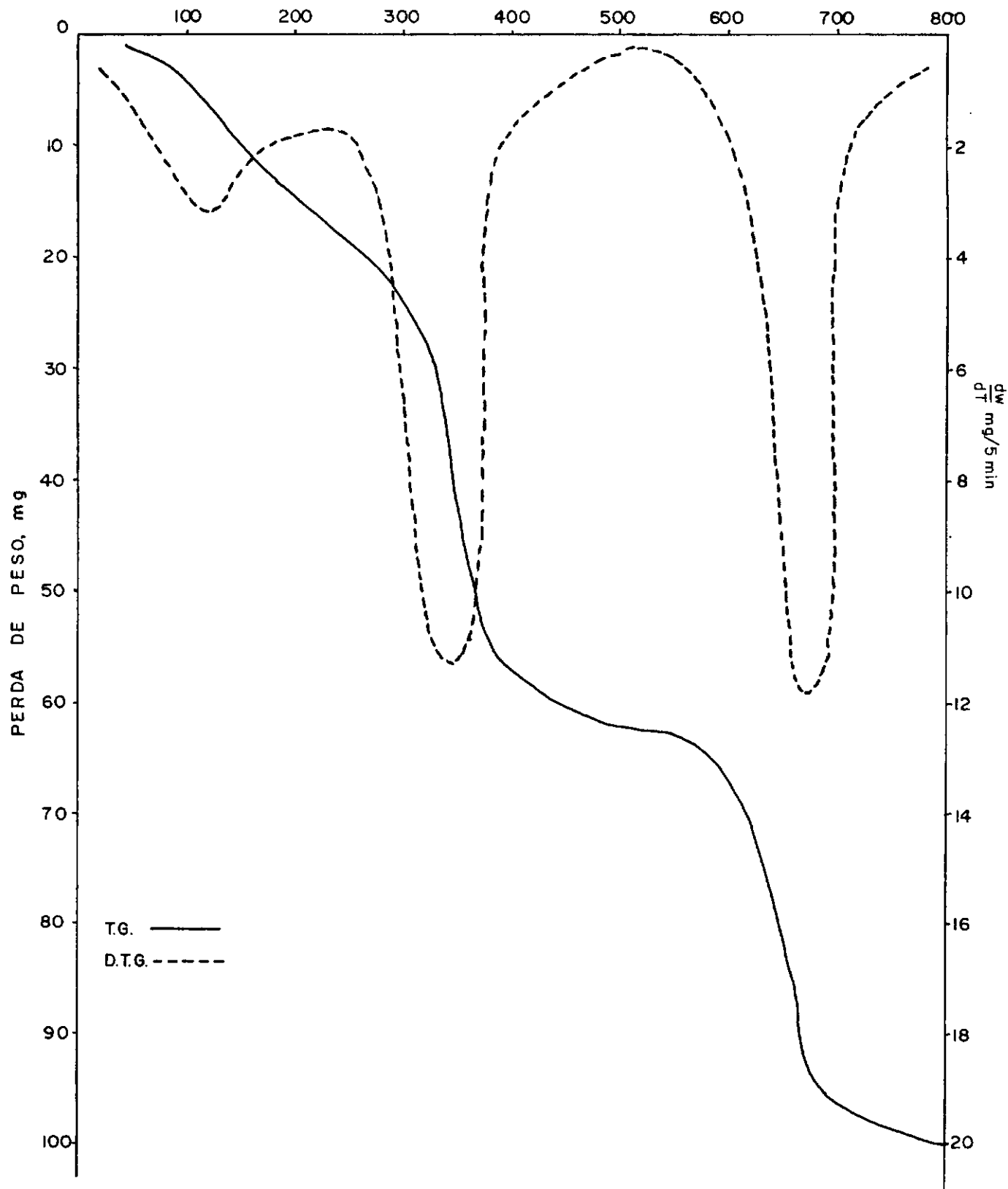


Figura 7.20. Curva de Análise Termogravimétrica (T.G.) e Diferencial Termogravimétrica (D.T.G.) para a fração concreção (sem separação de subfração). Jazida Nova Floresta a 1,2m de profundidade.

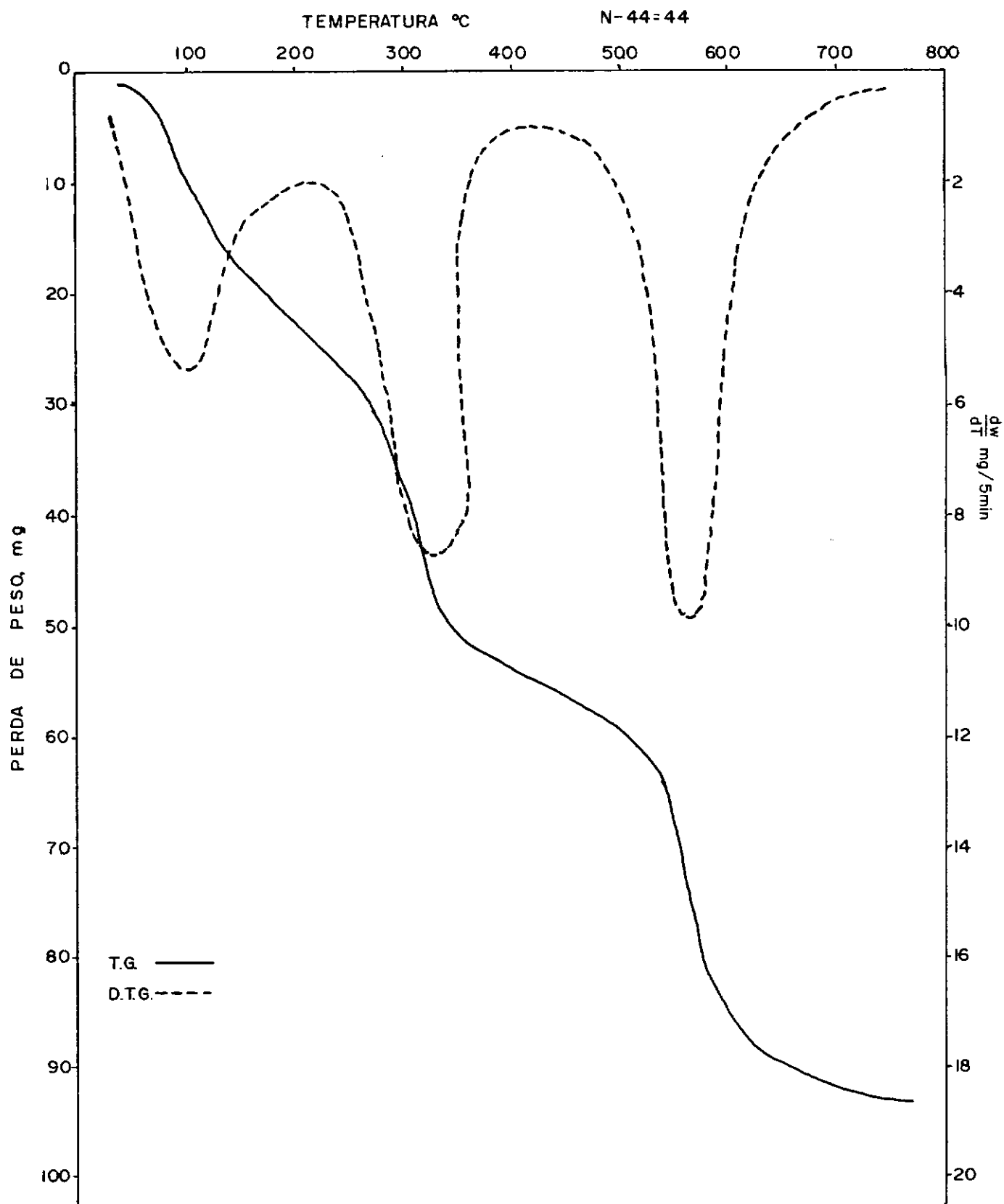


Figura 7.21. Curva de Análise Termogravimétrica (T.G.) e Diferencial Termogravimétrica (D.T.G.) para a fração concreção (sem separação de subfração). Jazida Sapê-Mari a 2m de profundidade.

TEMPERATURA °C

C-5=55

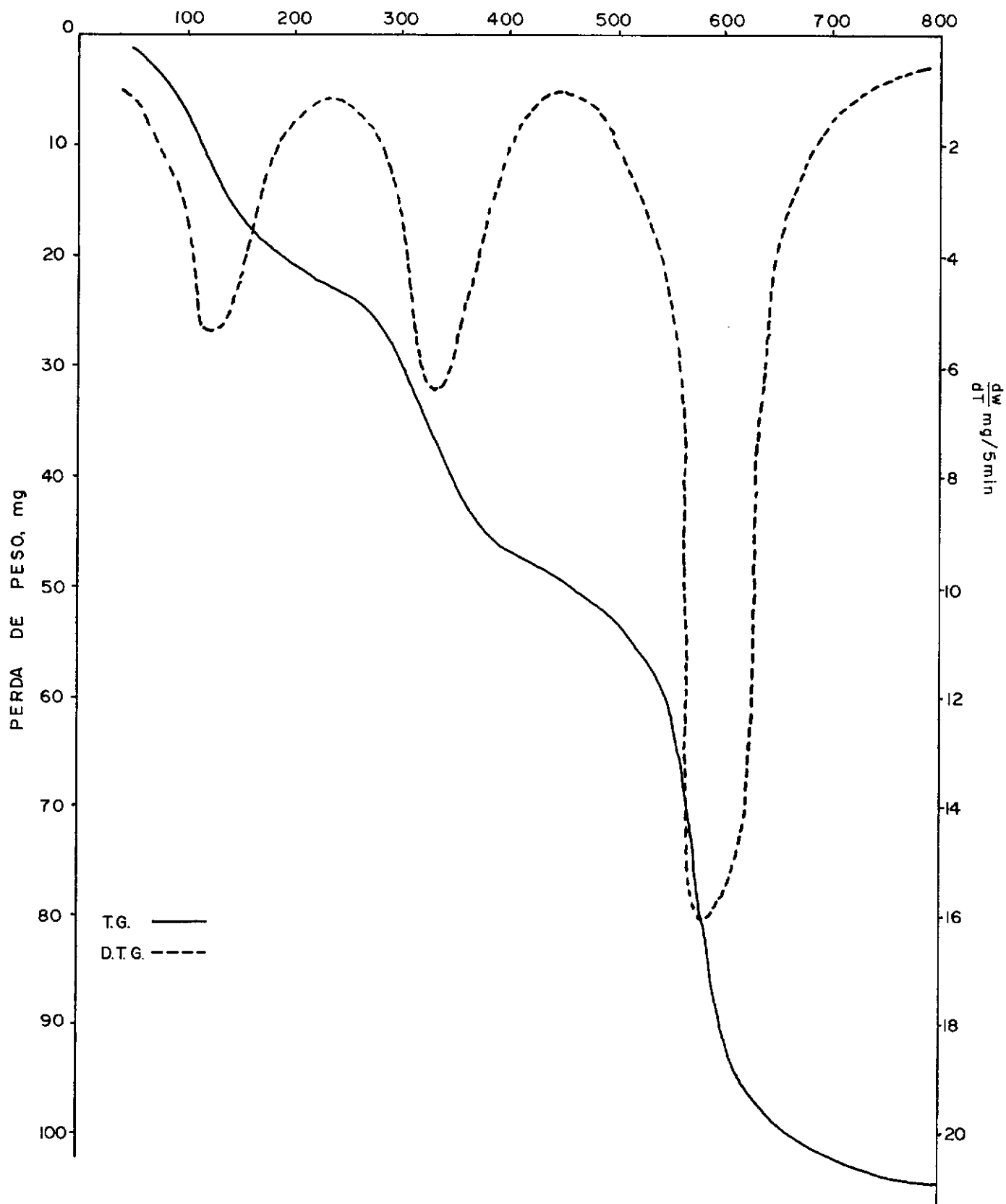


Figura 7.22. Curva de Análise Termogravimétrica (T.G.) e Diferencial Termogravimétrica (D.T.G.) para a fração concreção (sem separação de subfração). Jazida Sapé-Mari a 3m de profundidade.

TEMPERATURA °C

C-6=65+64

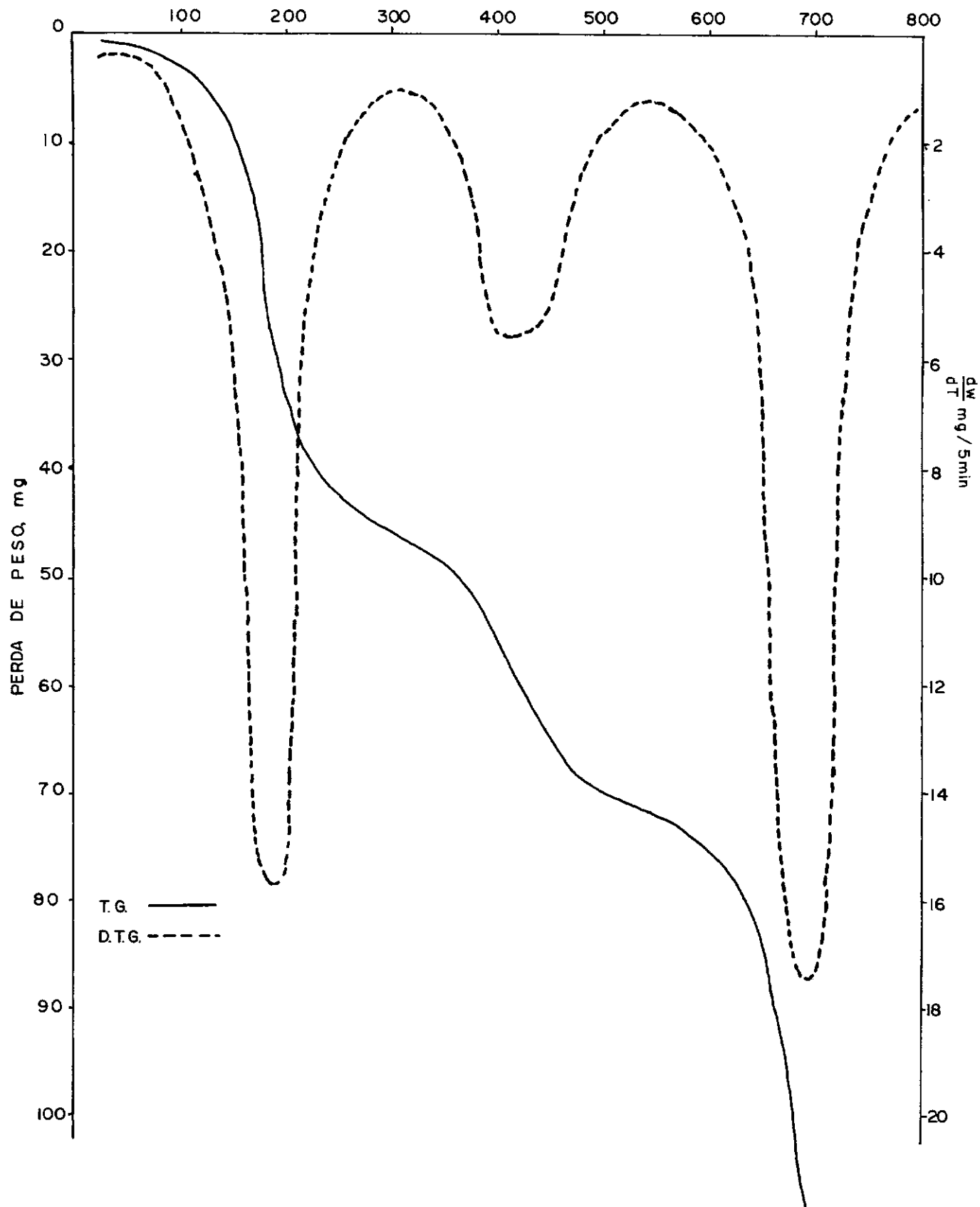


Figura 7.23. Curva de Análise Termogravimétrica (T.G.) e Diferencial Termogravimétrica (D.T.G.) para a fração concreção (sem separação de subfração). Jazida Sapé-Mari a 4m de profundidade.

TEMPERATURA °C

C- 7=75+71

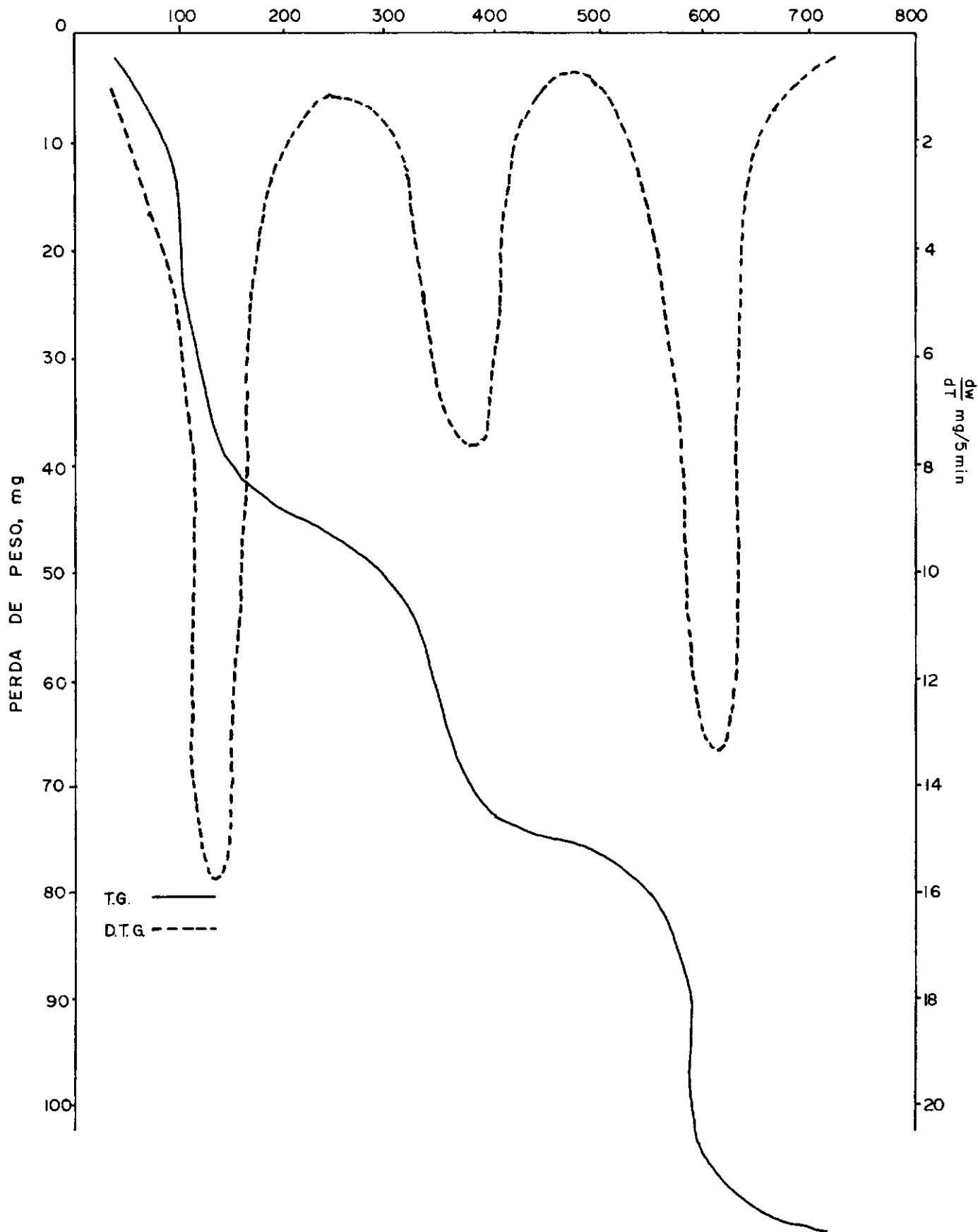
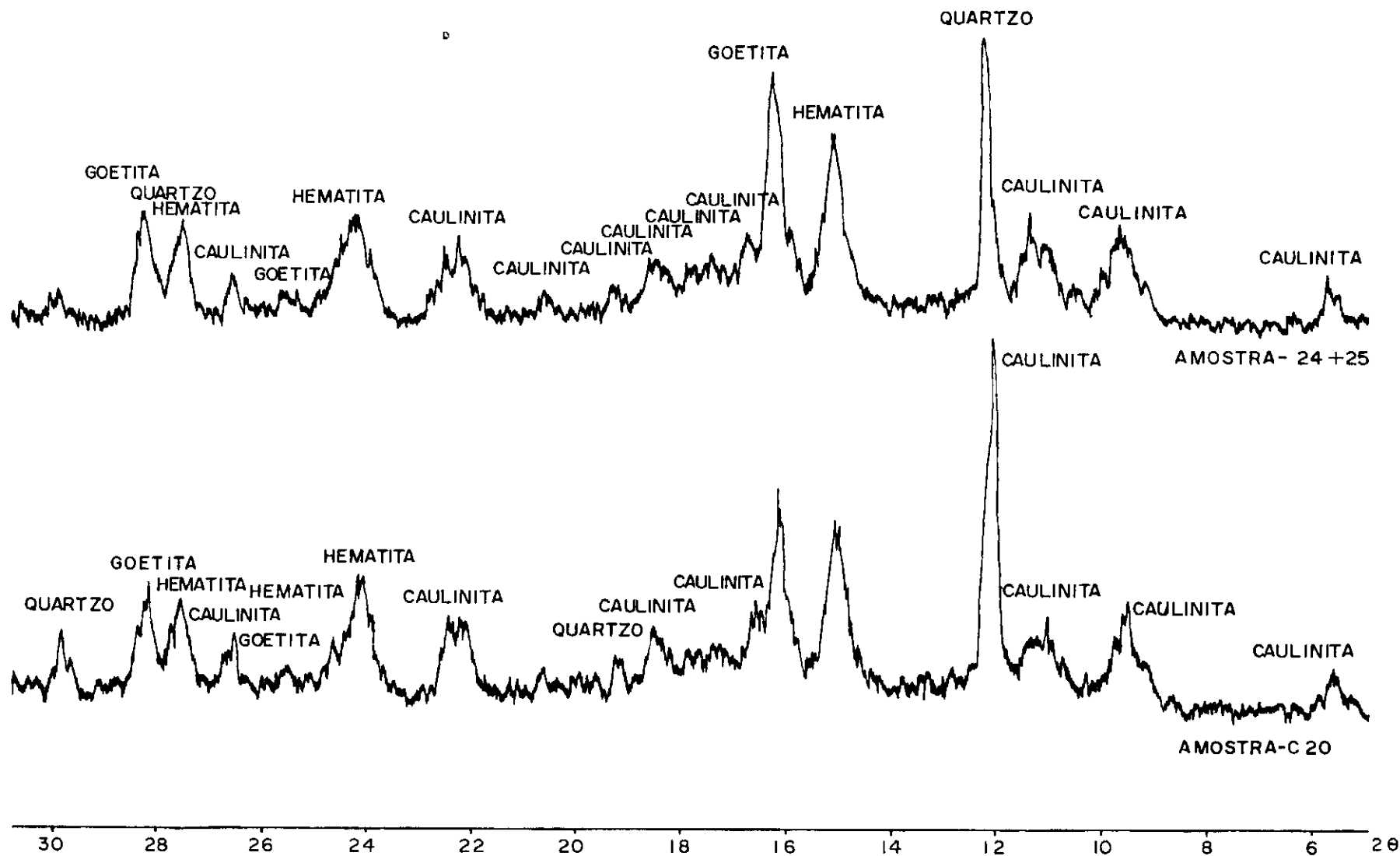


Figura 7.24. Difrátogramas de raios-X para as frações solo e concreção (sem separação de sub frações) correspondentes à jazida Cuité.

Figura 7.25. Difratoograma de raios-X para as frações solo e concreção (sem separação de sub_frações) correspondentes à jazida Cuíte.



AMOSTRA-C 20

Figura 7.26. Difratoograma de raios-X para as frações solo e concreção (sem separação de sub frações) correspondente à jazida Cuité.

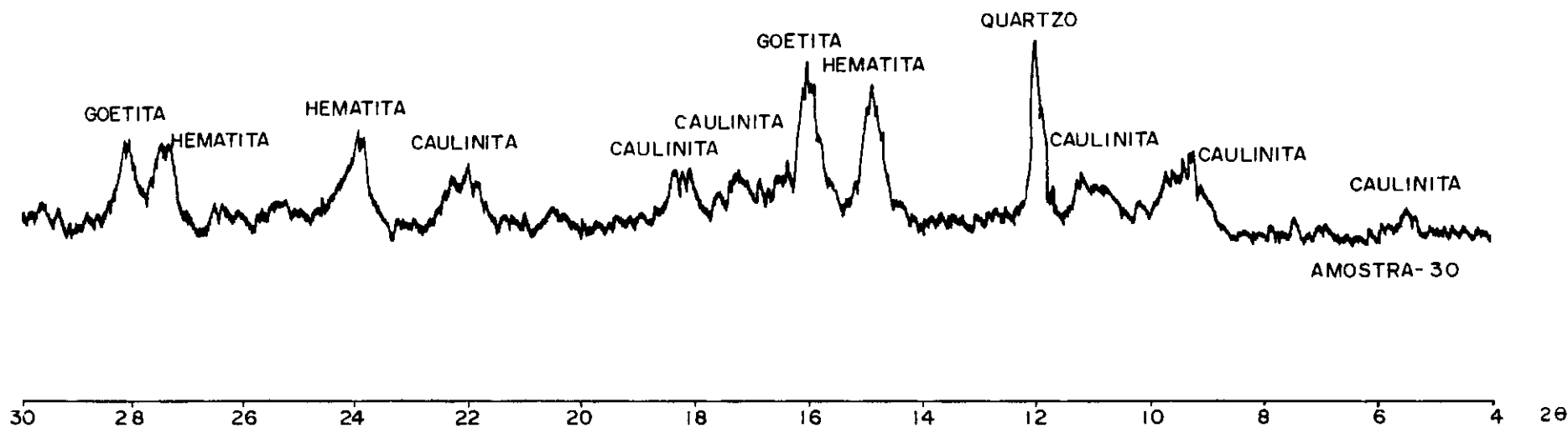
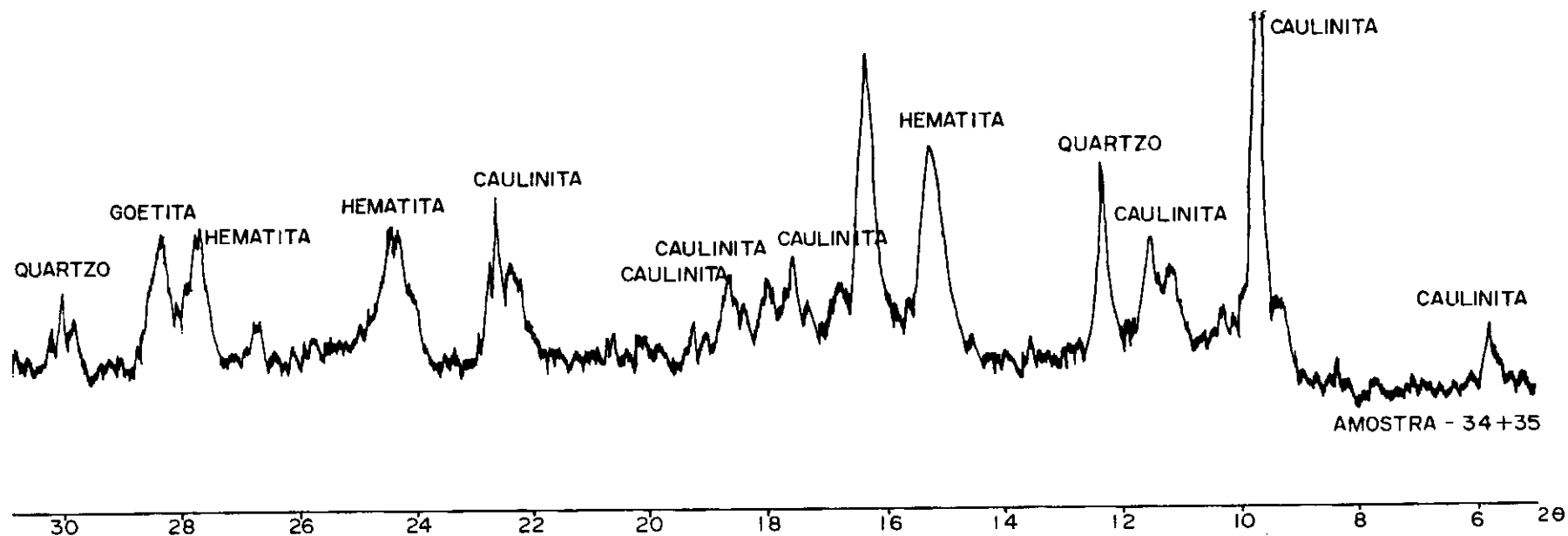


Figura 7.27. Difratoograma de raios-X para as frações solo e concreção (sem separação de sub fração) correspondente à jazida Nova Floresta.

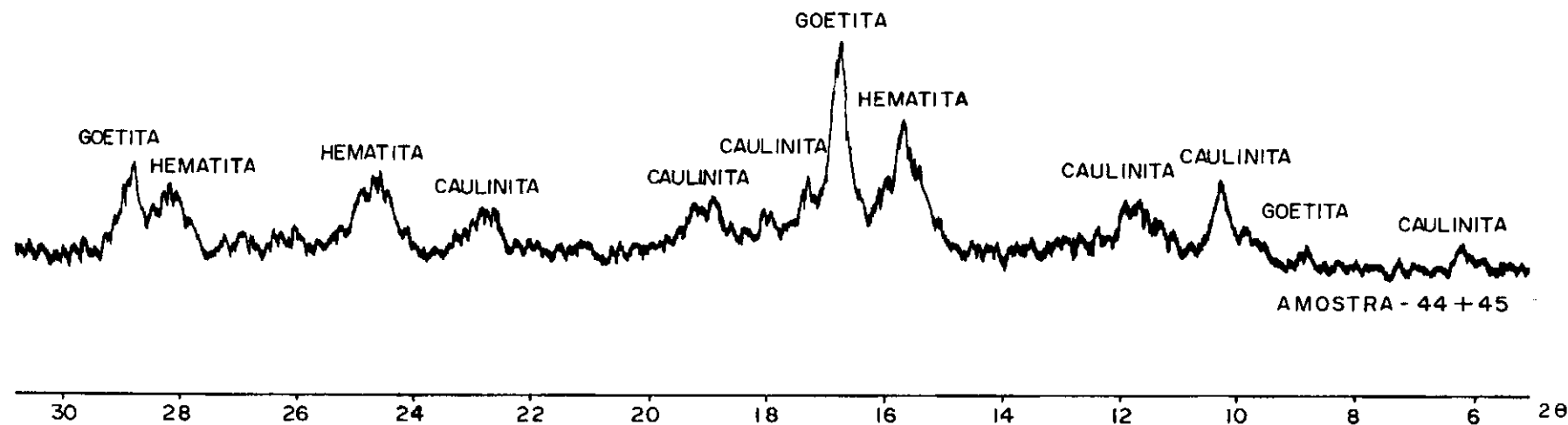
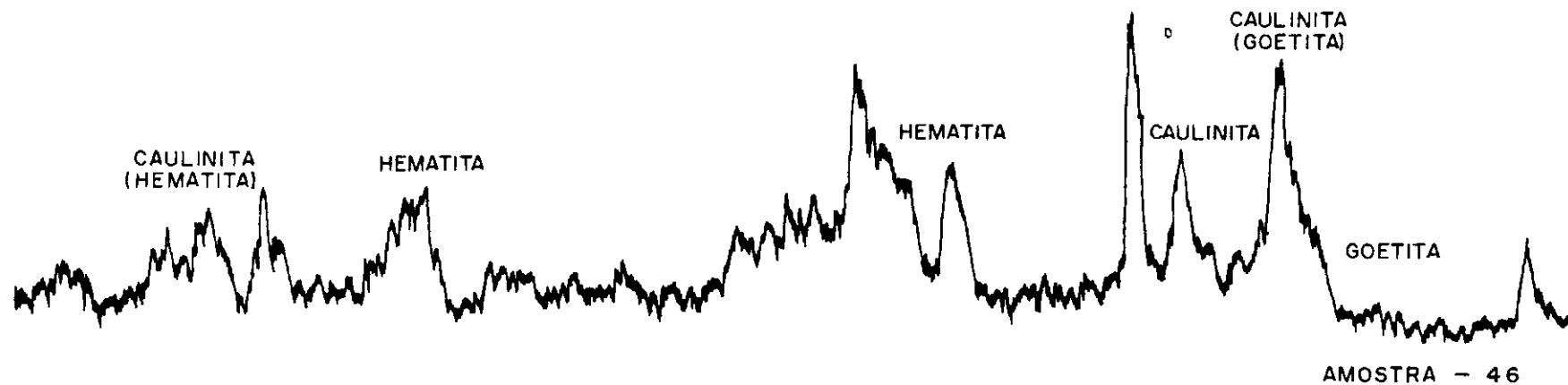


Figura 7.28. Difratoograma de raios-X para a fração concreção (sem separação de subfrações) correspondente à jazida Sapé-Mari.

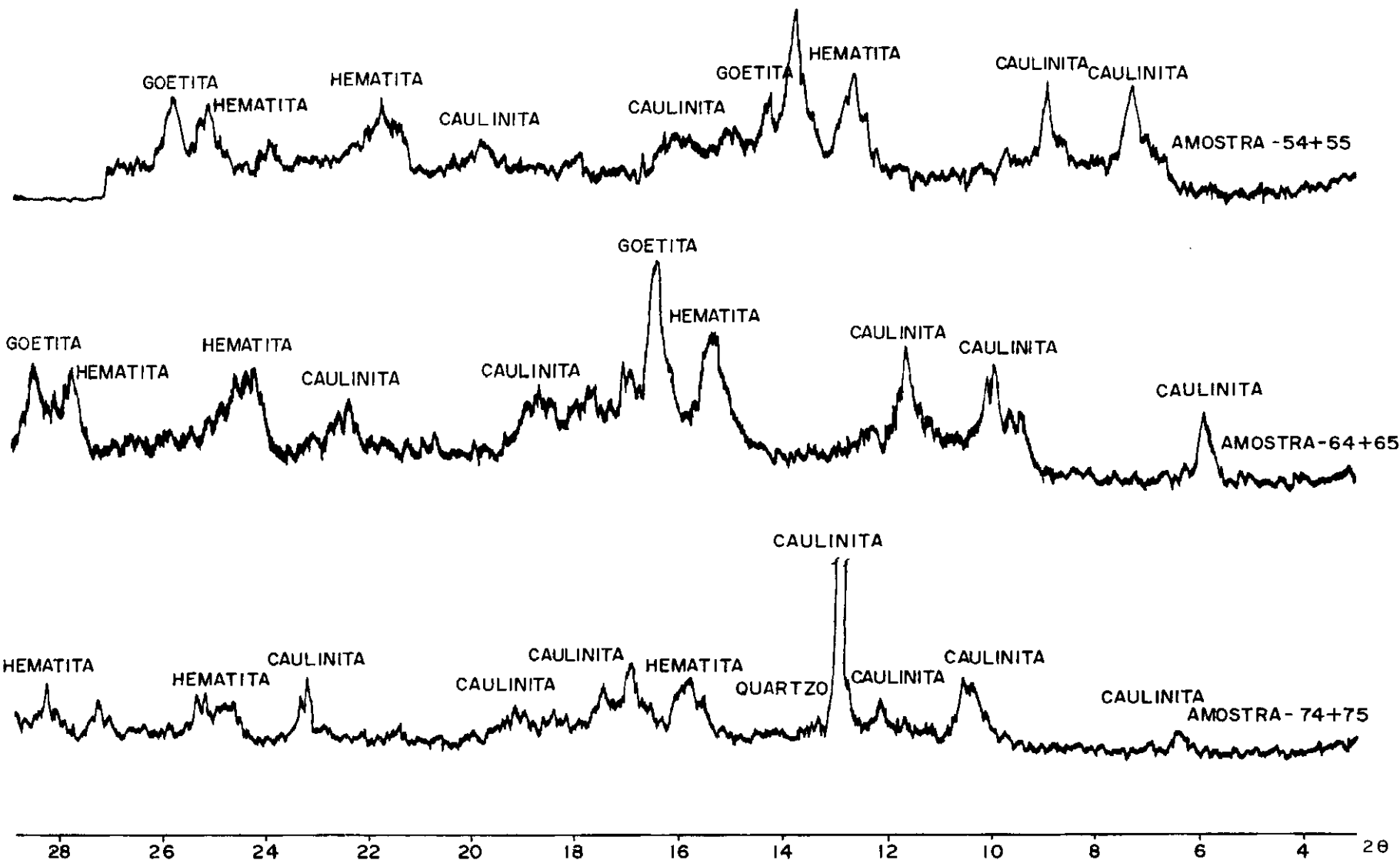


Figura 7.29a. Amostra 14 (concreção). Área geral mostrando vazios e agregados cimentados.

Figura 7.29b. Amostra 14 (concreção). Estrutura arredondada de pré-hematita desenvolvendo em um canal (vazio) previamente ocupado pelo óxido de ferro amorfo.

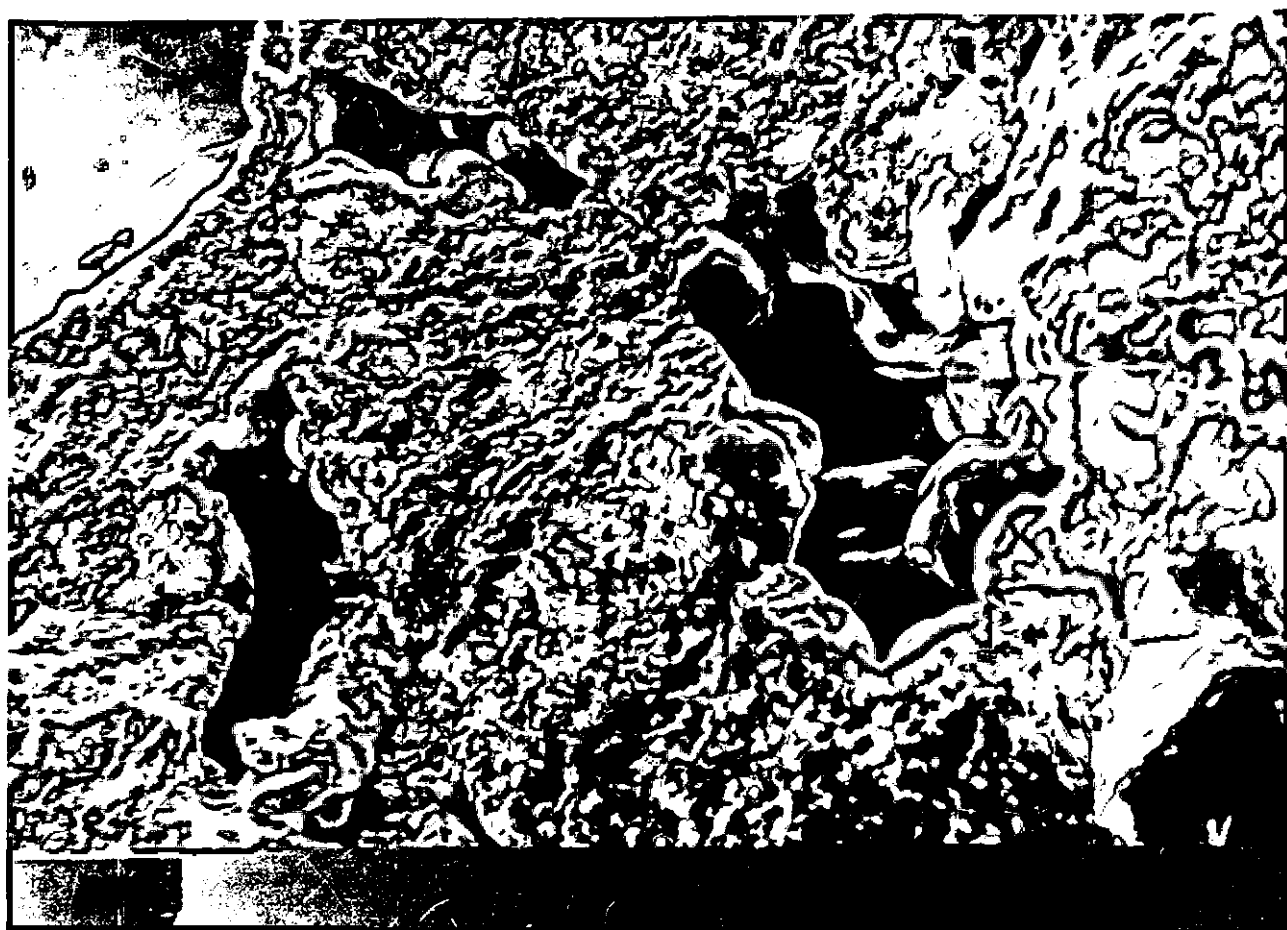
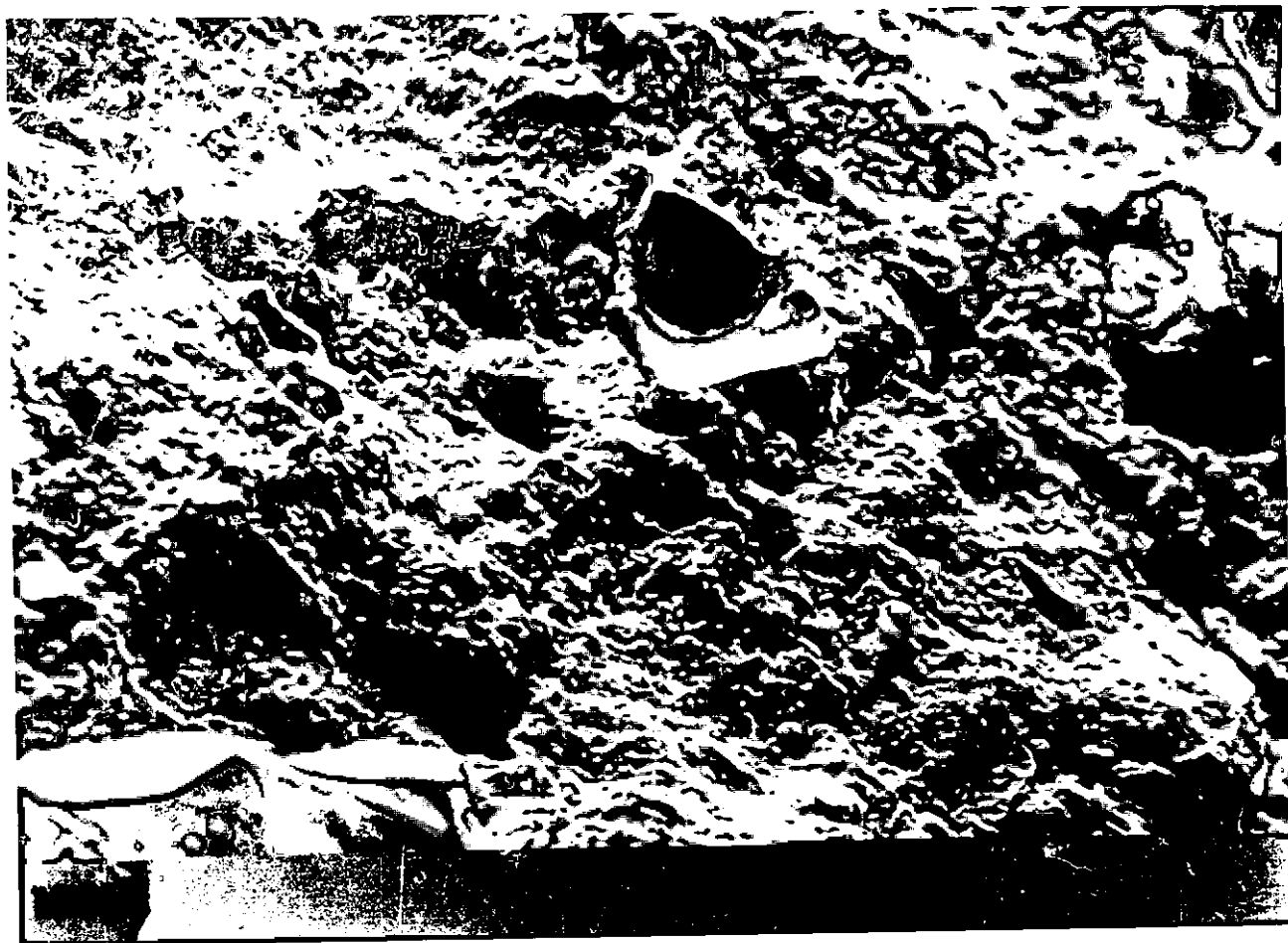


Figura 7.30a. Amostra 14 (concreção). Ampliação da Fi
gura 7.29b. Nota-se o aumento para o in
terior, o qual poderá provavelmente cul
minar em total ocupação dos vazios pelo
óxido de ferro e a formação de pequenas
concreções dos mesmos.

Figura 7.30b. Desenvolvimento do mineral argila (cau
inita) do material de formação deposi
tado em um vazio.



Figura 7.31a. Amostra 10 (solo). Vazios e partículas de solo cimentado, notando-se a falta de uma quantidade significativa de partículas de quartzo, encontradas em outras micrografias (veja Figura 7.35a.).

Figura 7.31b. Amostra 20 (solo). Área geral mostrando vazios, material agregado e o desenvolvimento de uma estrutura sem vazios.

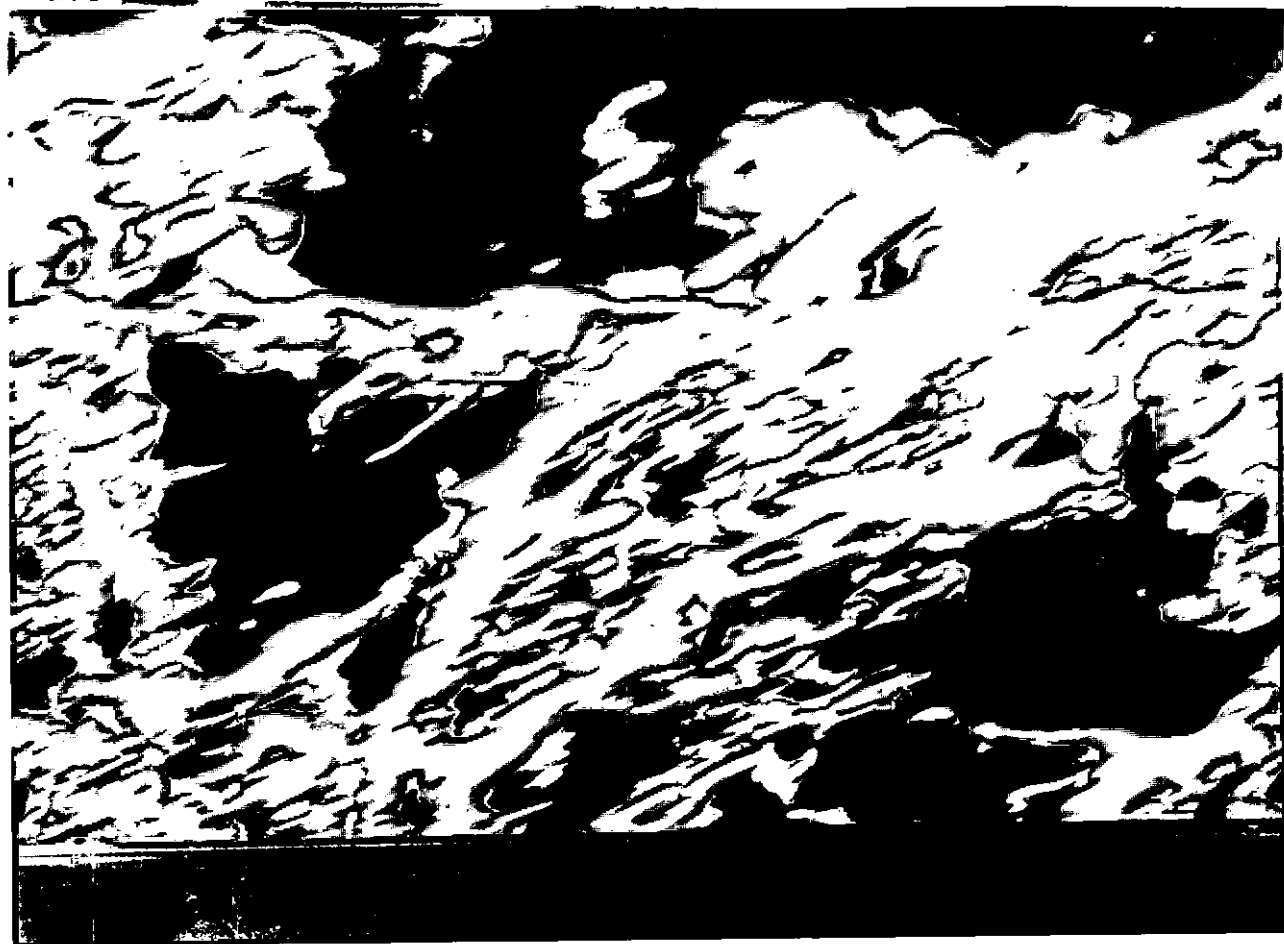


Figura 7.32a. Amostra 20. Figura 7.31b. ampliada. Nota-se um maior assentamento de camadas de material na borba de veio e a tendência para enserramento do material cristalino.

Figura 7.32b. Amostra 20. Maior ampliação da fotografia 7.32a. Pode ser vista a natureza fibrosa da estrutura interna da pré-hematita destacada.



Figura 7.33a. Área geral mostrando vazios, partículas de quartzo e agregados cimentados em uma concreção de Cuité.

Figura 7.33b. Amostra 24 - (concreção). Pré-hematita destacada desenvolvendo-se um vazio alongado. Os outros vazios desocupados foram provavelmente antes ocupados pe los agregados de quartzo, os quais fo ram removidos pelo descascamento.



Figura 7.34b. Amostra 24. Ampliação da Figura 7.33b. estrutura em forma de verme para a su perfície de destaque arredondada no va zio e uma estrutura interna fibrosa.

Figura 7.34b. Amostra 36 (solo). Partículas de quar tzo desalojadas e destaque sem cristaliz no na ocorrência de Cuité.

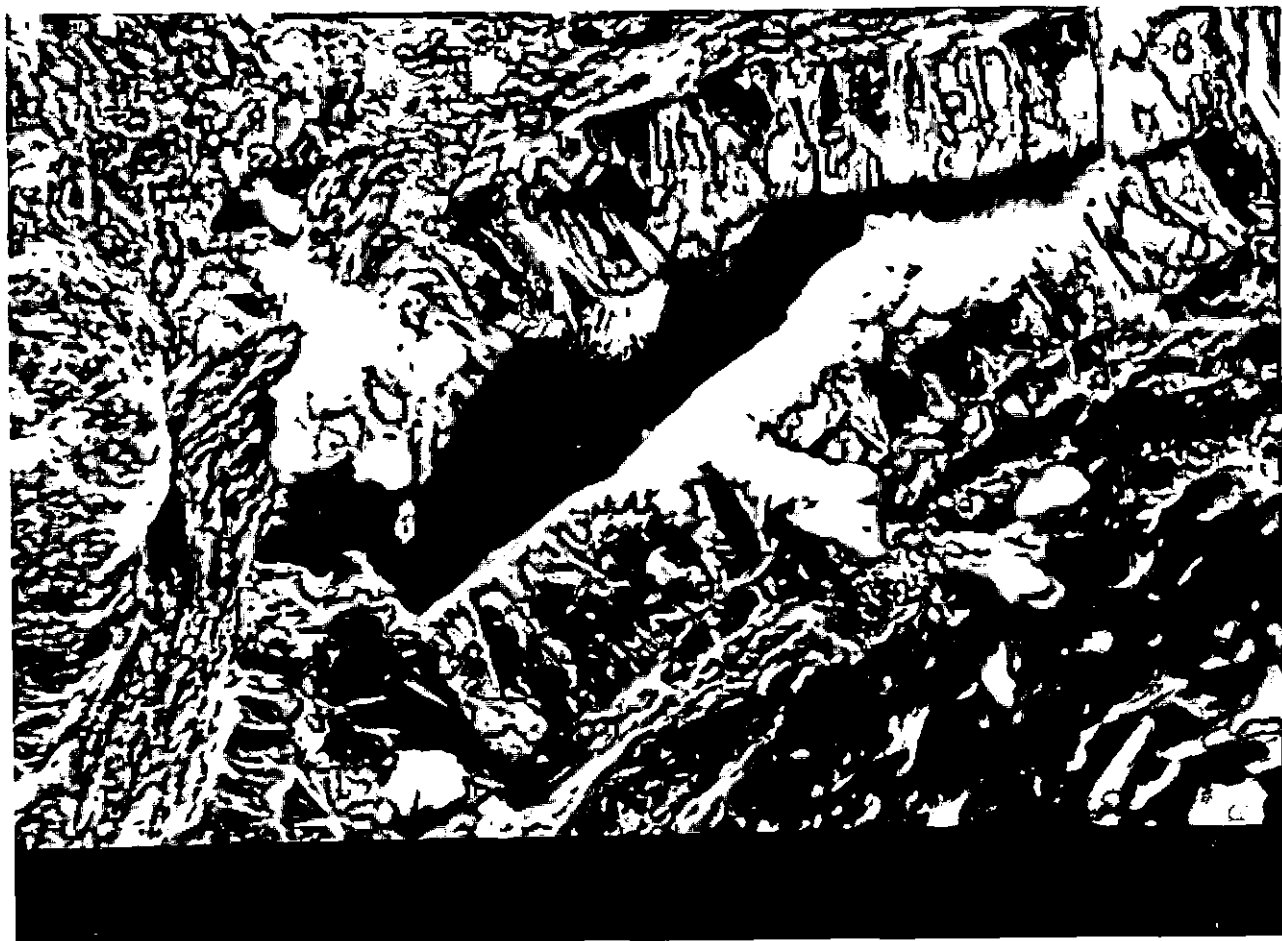


Figura 7.35a. Amostra 36. Ampliação da Figura 7.34b. Amostra retidas a 1,2m de profundidade da ocorrência Nova Floresta.

Figura 7.35b. Amostra 44 (concreções). Área geral mostrando vazios (desocupados e ocupados) e partículas cimentadas de cobertura es pessa do espécime de Nova Floresta.

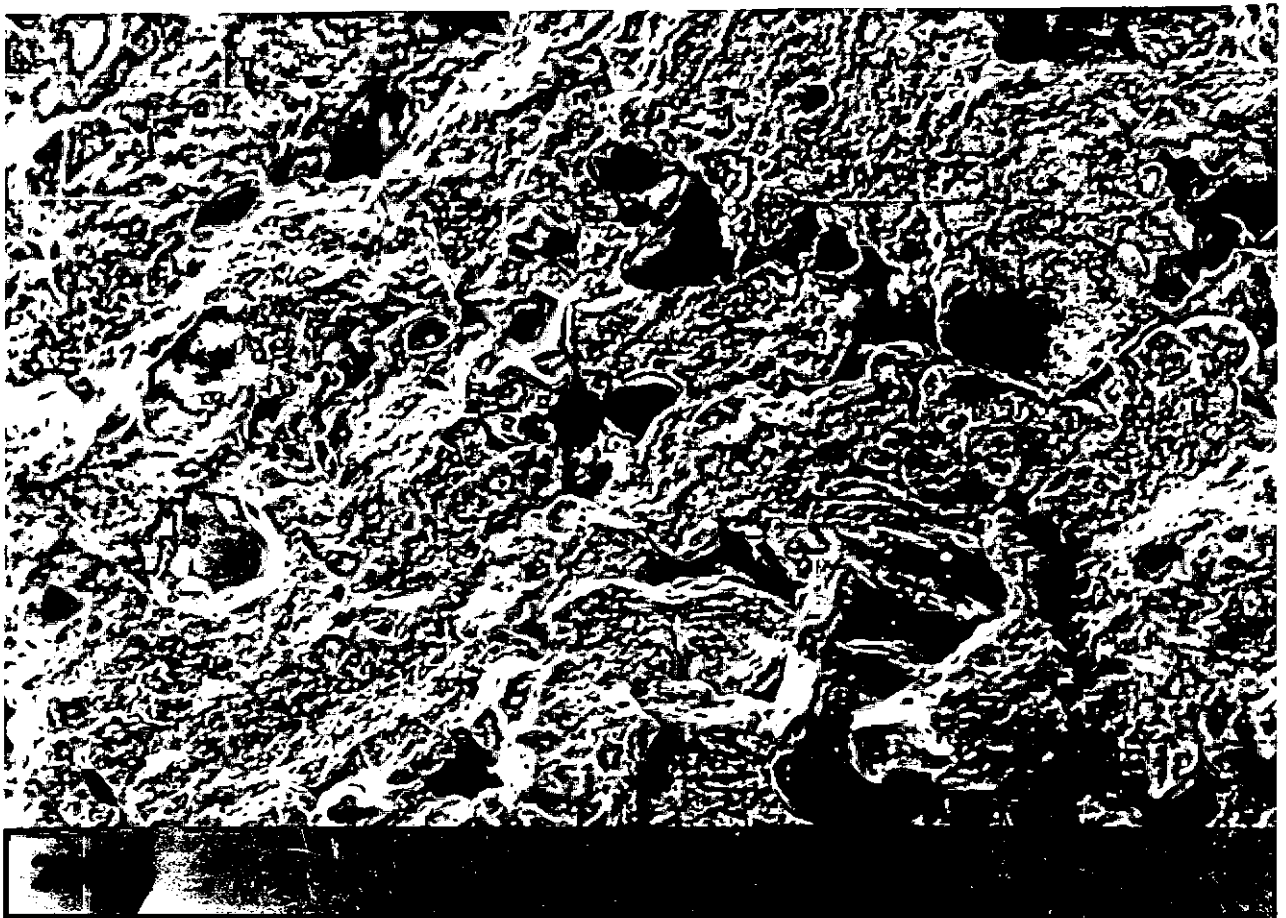
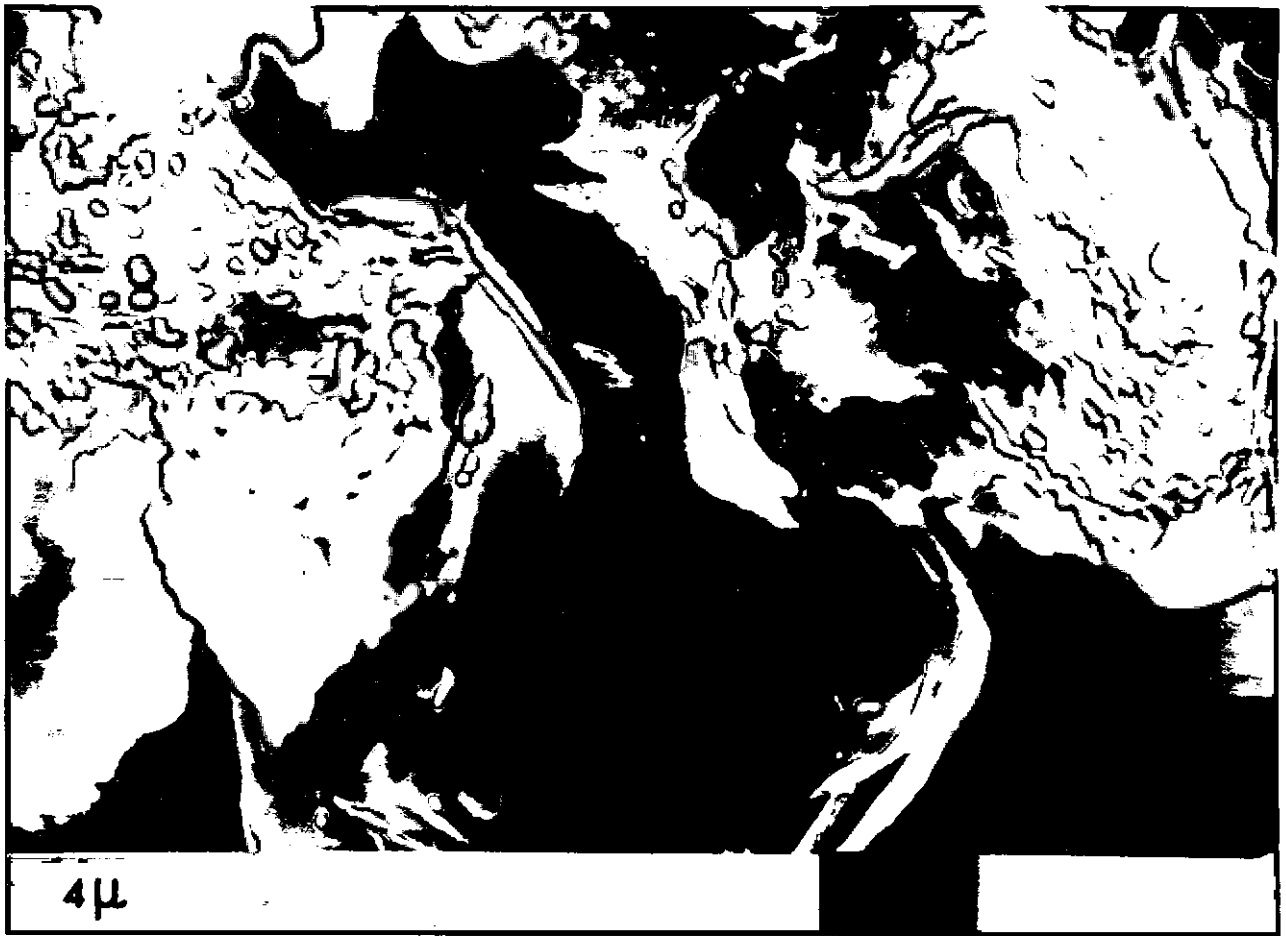


Figura 7.36a. Fotografia de espécime de Nova Floresta.

Figura 7.36b. Amostra 54 (concreção). Área geral mostrando vazios e membranas do espécime Sapé-Mari.

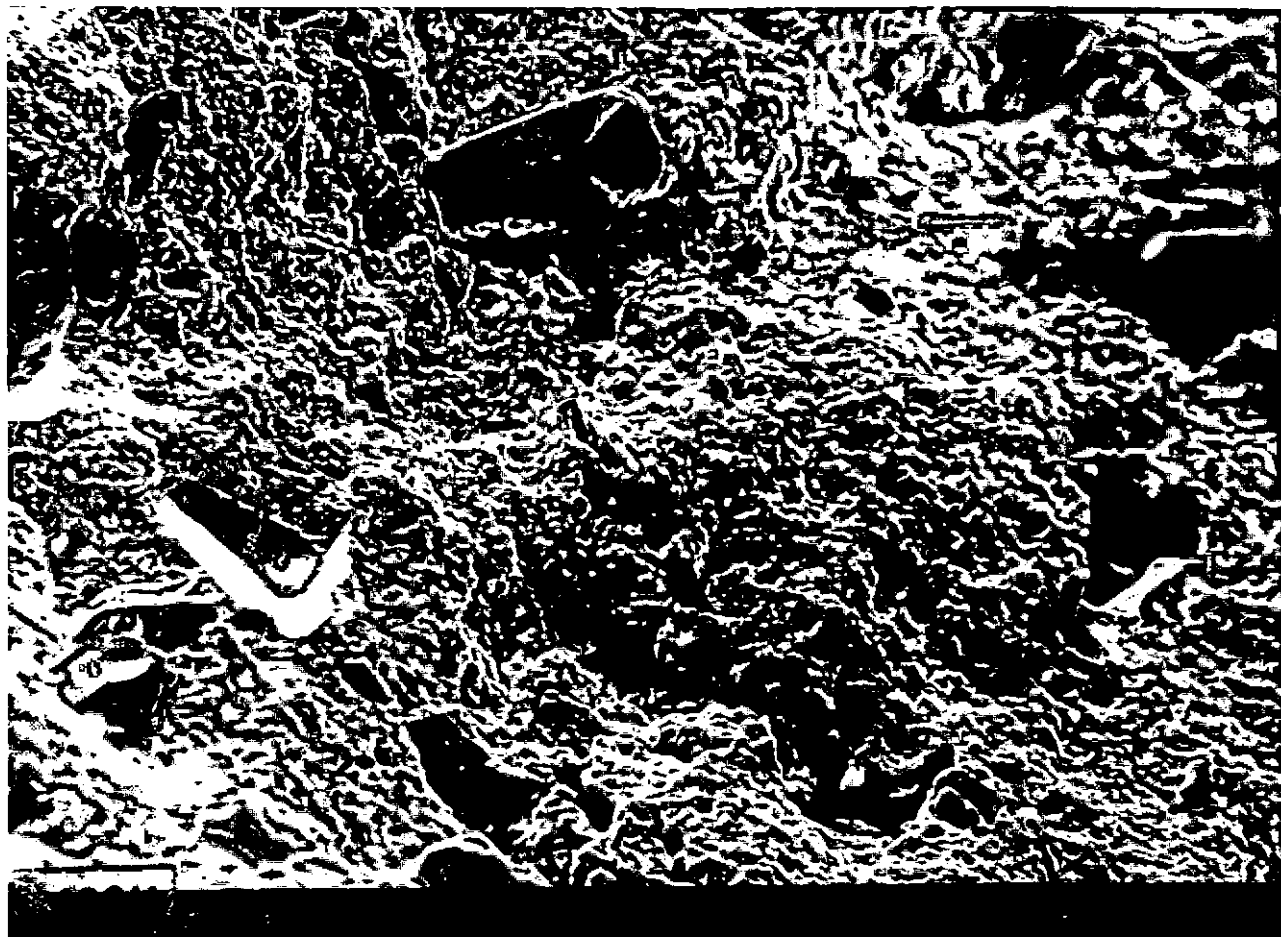


Figura 7.37a. Amostra 54. Partículas de quartzo e co
berta espessa em amostra Sapé-Mari.

Figura 7.37b. Amostra 54 - Ampliação da Figura 7.37a.
mostrando partícula de quartzo ahcada
com depressão provocada por solução na
superfície. Amostras retidas a 3m de
profundidade da ocorrência Sapé-Mari.



Figura 7.38a. Amostra 64 (concreção). Vazio da cober
ta espessa (a esquerda da Figura) com
algum grau de cristalização.

Figura 7.38b. Ampliação da Figura 7.38a. mostrando a
estrutura fibrosa da hematita se desenu
volvendo.



CAPÍTULO 8

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

8.1. Introdução

A informação obtida durante a execução das experiências de laboratório, as observações durante a pesquisa de campo e os dados sobre propriedades de engenharia fornecidos por outros pesquisadores trabalhando no programa de estudo de solos vermelhos latificados do Estado da Paraíba, são discutidos neste capítulo.

8.2. Resultados da Análise Química

Vários aspectos da distribuição de teor de sílica, alumina e ferro parecem de grande interesse. Estes são:

- a) a similaridade das distribuições dos óxidos em função do tamanho das subfrações para as amostras de Cuité e Nova Floresta confirma satisfatoriamente as observações de campo no sentido de que estas jazidas são parte da mesma formação. No entanto, as diferenças destas jazidas com os resultados da jazida Sapê-Mari confirmam a idéia de que as condições climáticas e topográficas nesta formação foram um tanto diferentes daquelas da formação Cuité-Nova Floresta.

b) Os resultados mostram uma marcante diferença de teor de Fe para as subfrações do solo em comparação com as subfrações das concreções. Maiores teores de Fe para as jazidas de Cuité e Nova Floresta, e, em geral, um tanto menores para as da jazida Sapé-Mari. Estes resultados são concordantes com resultados de outros investigadores do assunto, que informam o mesmo tipo de diferenças de concentração de Fe para as frações solo em relação às frações das concreções. Sabe-se que a formação de concreções ferruginosas é associada a condições moderadas de lixiviação. Os três estágios essenciais para sua formação são: mobilização do ferro em solução, transporte e imobilização no horizonte de acumulação. Os aspectos físico-químicos deste processo são ainda discutidos por cientistas interessados neste campo, no entanto pode-se elaborar neste processo da seguinte maneira:

O ferro é mobilizado em solução no estado ferroso do material ferruginoso original, e move-se como tal até que encontre condições de oxidação. Sob estas condições o ferro ferroso se oxida para o estado férrico o qual é insolúvel na água. Se a oxidação for rápida todo o ferro é imediatamente transformado para o estado férrico. O ferro então se precipita como um gel de óxido férrico hidratado. Na desidratação o gel forma o lepidocrocite hidratado indefinido que numa desidratação posterior muda para o hidrato cristalino indefinido, que é a goetita. Com a desidratação completa é formada a hematita cristalina. O processo é irreversível a menos que haja uma mudança nas con

dições de oxidação. Se a oxidação for lenta pode ser formado algum óxido ferroso - férrico como magnetita cristalina.(24).

O gel de óxido férrico hidratado ou a magnetita, a medida que se precipita, pode encerrar partículas estranhas tais como fragmento de rochas grãos de quartzo ou partículas de solo e efetivamente cimentados a medida que o processo de desidratação continua. A precipitação pode ocorrer em redor de um núcleo de modo que a forma produzida neste caso é a da pisolita. Estas pisolitas podem ser duras ou moles dependendo do grau de desidratação do material.

As condições de precipitação de hidróxidos de ferro são as seguintes: Hidróxido de ferro básico é precipitado num intervalo de pH de 2,5 a 3,5, mas hidróxido ferroso não é precipitado necessariamente abaixo de um pH de 5,5. Na ausência estrita de oxigênio, numa atmosfera de hidrogênio, o hidróxido ferroso completamente reduzido é precipitado no pH 8,1, um precipitado escuro verde oliva, possivelmente $Fe_3(OH)_8$ é formado no pH 6,4. Na presença de ar, a precipitação toma lugar no pH 5,3. Isto sugere que o ferro ferroso moverá no perfil do solo muito mais prontamente que se imaginou antes como possível, contanto que prevaleçam condições estritamente anaeróbicas, tais condições tem sido frequentemente vizualizadas em discussões sobre a origem das lateritas.

As condições climáticas, especialmente média de precipitação anual, clima e período anual de secas que produz deficiência de umidade dos solos (aproximadamente cinco meses por ano), ex

plicam a presença de concreções nos depósitos estudados.

As concentrações dos óxidos de ferro nestes depósitos parecem ser uma das variáveis mais importantes na formação de concreções. A forma dos óxidos, isto é, amorfos ou cristalinos (com variável grau de cristalinidade) influenciou sua dureza e, portanto, suas propriedades de resistir à desagregação quando submetidos a esforços mecânicos. No entanto, deve-se considerar outras variáveis que ainda influenciaram o grau de metaestabilidade das concreções. Estas são a presença de outros compostos amorfos, tais como sílica e alumina. O grau de porosidade das concreções, que é uma função complexa da distribuição aleatória de vazios e conteúdo de materiais acumulados, parece ser ainda uma variável de grande importância, sobretudo porque sua consideração permite visualizar um mecanismo de formação das concreções que no momento é ainda pouco esclarecido.

- c) A distribuição do teor de sílica em função do tamanho das subfrações é muito interessante. Como foi dito na apresentação dos resultados, o conteúdo de sílica nas subfrações alcança um máximo para as frações tamanho silte. Poderia pensar-se que a distribuição de sílica deveria aumentar com o tamanho das subfrações em virtude da presença de quartzo nos tamanhos maiores. No entanto, nesta pesquisa se encontrou que o teor de sílica é máximo para a fração silte; isto é explicado plausivelmente aceitando-se que na fração silte existe sílica na forma amorfa. Esta idéia é consolidada, analisando-se as razões moleculares S/A para as subfrações tamanho argila e tamanho silte que foram apresentadas nas Tabelas 7.1, 7.2, 7.3, do Capítulo anterior. Pode-se ver que a razão S/A para tamanho argila é menor que 2 ou muito perto de 2 (o valor de 2 corresponde à argila mineral de tipo 1:1 com per

feita cristalinidade). Os desvios do valor 2 indicam somente que o grau de cristalinidade da caulinita presente nestes materiais é variável e possivelmente existe alguma porcentagem de alumina amorfa. No entanto, para a subfração tamanho silte a razão molecular S/A foi na maioria dos casos maior que 2. Este fato pode ser explicado se se aceita a presença de sílica amorfa. Isto é examinado mais adiante, quando se discutem os resultados da Análise Térmica e ainda quando se tenta interpretar a reatividade destes materiais com adição de cal.

8.3. Resultados da Análise Mineralógica

As análises apresentadas de raios-X, A.T.D., T.G. e DTG confirmam a presença de quartzo, caulinita com diferente grau de desordem no eixo cristalográfico b, hematita e goetita. As curvas de A.T.D. e D.T.G. mostram ainda a presença de materiais amorfos. Estes são ainda confirmados pelo estudo da micro-estrutura e os altos valores da área específica que se discutem mais adiante.

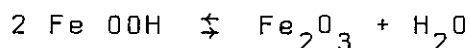
Uma análise quantitativa aproximada foi realizada com os resultados das curvas de D.T.G. para obter valores aproximados de teores de caulinita e goetita para todas as subfrações tamanho argila e silte das três jazidas. Ao mesmo tempo se calcularam as porcentagens de caulinita dos resultados da análise química. Estes valores são apresentados na Tabela 8.1. O cálculo foi baseado nas seguintes suposições:

A fórmula estrutural da caulinita é $(OH)_8Si_4Al_4O_{10}$, sua composição teórica expressa em óxidos é SiO_2 46,54%; Al_2O_3 39,50% ; H_2O 13,96%. Admitindo que a porcentagem de alumina encontrada na análise química corresponde à alumina da caulinita em sua totalidade, então a porcentagem de caulín em cada subfração é encontrada dividindo-se o valor de alumina da análise química pela porcentagem teó

rica de 39,50 e multiplicando este por 100.

Para o cálculo baseado nas curvas D.T.G. mediram-se as áreas dos picos correspondentes à caulinita e goetita e estas deram diretamente as perdas de peso de ambos. Para a caulinita dever-se-ia, em teoria, admitir que 13,96 por cento de água dariam 100% de caulinita; no entanto, sabe-se que caulinitas desordenadas contêm água estrutural em menor proporção. Por falta de dados de caulins brasileiros neste aspecto foi admitido que o valor total da perda de água só é igual a 10%. Com este valor então se calculou a porcentagem de caulinita nas subfrações examinadas.

Para cálculo da porcentagem de goetita, na mesma forma se utilizou a equação de transformação seguinte:



onde um material com 100% de goetita deveria perder 10,5% em peso de água.

Os valores da Tabela 8.1 mostram que para todas as subfrações de tamanho argila com exceção de uma, a porcentagem de caulinita calculada das curvas de D.T.G. é menor que a porcentagem calculada da análise química. Isto quer dizer que, de acordo com os resultados, existe excesso de alumina na fração argila. Este excesso é interpretado no sentido de que há presença de alumina amorfa na fração argila. No entanto, nas subfrações tamanho silte a tendência contrária é mostrada; isto é, a porcentagem de caulinita calculada das curvas D.T.G. é sempre maior que a porcentagem calculada da análise química. Como esta última é baseada no teor de alumina, então a única explicação plausível é que há excesso de sílica nesta fração. Todavia, poder-se-ia argumentar que o excesso de sílica vem do quartzo presente nesta fração. Isto, neste caso, não é aceitável, desde que a porcentagem de sílica nas frações maiores, onde o quartzo está mais em evidência, é menor que a porcentagem de sílica nas subfrações tamanho silte. Desta maneira parece óbvio que a dedução feita com base nos resultados é aceitável.

8.4. Análise da Microestrutura

O microscópio eletrônico de varredura é um instrumento de grande importância para o estudo da microestrutura de solos, particularmente quando se quer estudar arranjos geométricos e distribuições dos componentes do material e da fase vazios presente em todas as estruturas dos solos. A grande vantagem deste instrumento é que é possível observar as microestruturas em três dimensões. Esta vantagem compensa a desvantagem de limitação da magnificação das superfícies a ser observadas. A análise levada a cabo durante esta pesquisa apresentada nas figuras 7.29 a 7.38 mostra como característica geral dos materiais estudados a presença generalizada de materiais amorfos (óxidos de ferro e sílica) como agentes cimentantes das partículas tamanho argila e, finalmente, como a matriz contínua das estruturas observadas. Dentro desta matriz, pode-se ver partículas de quartzo envolvidas, mas ligadas fracamente à matriz. O aspecto mais interessante observado é a condição dos canais que formam os vazios do material; em todos os casos, as paredes destes canais estão recobertas de materiais amorfos e estágios de pré-hematita caracterizados pela forma globular das deposições. Por outro lado, as Figuras mostram, em alguns casos, o processo de deposição e início de cristalização dos óxidos amorfos. Na Figura 7.32a e 7.32b, por exemplo, pode-se ver que existem bandas de deposição que provavelmente correspondem aos ciclos de deposição decorrentes do fluxo alternado das soluções de óxidos de ferro e sílica correspondente aos períodos de insuficiência de água no solo.

As amostras da jazida Cuité indicam, por exemplo, que a porosidade é menor para uma profundidade de 1 metro do que para 2 metros. Nota-se ainda falta significativa de partículas de quartzo para uma profundidade de um metro. As formas globulares (semelhantes a pinhas) são claramente destacadas nas paredes dos canais dos vazios.

O desenvolvimento desta estrutura arredondada de pré-hematita parece originar-se nos vazios onde os diâmetros dos canais são condizentes a condições de alta sucção e nos pontos onde a alta tensão superficial atua como acelerador de precipita

ção e acumulação dos materiais em solução. Nos estágios mais avançados do processo de laterização resulta a formação de hematita. Ainda mais, é interessante ressaltar que a estrutura interna dos glóbulos considerados como o estado de pré-hematita tem uma estrutura fibrosa com um grau apreciável de cristalização. Esta é a primeira vez que este tipo de estrutura tem sido revelado em estudos desta natureza.

Nas subfrações provenientes da jazida Nova Floresta pode-se apreciar a similaridade de microestrutura com as de Cuité (um metro de profundidade).

Ao contrário do que ocorre com a microestrutura das amostras de Cuité, as amostras de Sapé-Mari não acusam porosidades diferentes em função da profundidade, mas a presença de formações de pre-hematita é ainda evidente. Em algumas das figuras apresentadas para os materiais desta jazida se encontraram estruturas de caulinita certamente desordenada e livres da cobertura de óxidos. Todavia, em forma qualitativa, as agregações de caulinita recobertas de material amorfo destacam formas reconhecíveis desta, permitindo então dizer-se que a cobertura amorfa é muito delgada. Isto foi confirmado indiretamente durante o processo de preparação das subfrações onde as subfrações de diâmetro entre 9,5mm e 2,0mm foram desagregadas facilmente durante o estágio de lavagem.

8.5. Análise da Área Específica

Os valores da área específica apresentados na Tabela 7.4 do Capítulo anterior mostram que não existe uma correlação entre diâmetro médio e área específica. No entanto, as áreas específicas das subfrações argila são, na maioria dos casos, maiores que as áreas específicas das subfrações tamanho silte. Todavia, os valores de áreas específicas são muito maiores do que se poderia esperar para as porcentagens de caulinita presente nas amostras. A explicação reside no fato de que os materiais amorfos, especialmente os óxidos amorfos de ferro, exibem altas áreas específicas: por exemplo, os valores conhecidos de ferro amorfo no laboratório alcan

çam a $100 \text{ m}^2/\text{g}$ e as goetitas dão valores até de $80 \text{ m}^2/\text{g}$. Os altos valores de áreas específicas, pensa-se têm importância não só no aspecto de capacidade de retenção de água, mas também no aspecto de comportamento a tratamento químico nos processos de estabilização para trabalhos de engenharia.

8.6. Propriedades de Engenharia dos Materiais Estudados.

Uma análise das propriedades de engenharia sumaria das nas Tabelas 7.5, 7.6 e 7.7 do Capítulo anterior mostra uma série de aspectos de interesse que são comentados a seguir:

- a) A classificação que, no momento, se sugere como a mais apropriada para uso na engenharia civil (veja Capítulo 3) é a desenvolvida durante os estudos de solos lateríticos da África. De acordo com esta, os materiais das três jazidas estudadas podem classificar-se como solos ferruginosos. Apesar disso, a grande variedade dos resultados obtidos mostra que esta classificação é de muito pouca utilidade. Por exemplo, as variações de resistência destes materiais em termos de CBR, quando estabilizados com cal, mostram que estes têm comportamentos muito diferentes.

Uma explicação só pode ser desenvolvida com conhecimento das propriedades intrínsecas destes materiais. As diferenças de reatividade e ainda as diferenças ocasionadas por diferentes tipos de cais, além dos altos valores de resistência que não poderiam acreditar-se para solos com teores baixos de argilo-mineral do tipo da caulinita, podem ser explicadas em termos dos resultados

das análises obtidas durante esta pesquisa. O bom comportamento ao tratamento de cal é, por exemplo, explicado como devido à sílica amorfa presente nos materiais que produz um dos componentes essenciais para a formação de silicatos hidratados de cálcio. Além de mais, a solubilidade da caulinita desordenada é muito maior que a solubilidade de uma caulinita bem cristalizada. A presença de óxidos de ferro amorfo, teoriza-se, poderá formar compostos hidratados de ferro e alumínio para contribuir na alta resistência destes materiais, quando estabilizados com cal. Outro aspecto que pode considerar-se para interpretar estes resultados, é a presença de porcentagens não esperadas de $P_{2.0}^{0.5}$ que não só promovem a solubilidade dos óxidos de ferro, mas ainda contribuem para a formação de compostos cimentícios na presença de cal.

- b) As resistências à compressão simples dos três materiais estabilizados com cimento mostram grande variação. Por exemplo, a resistência à compressão simples para uma porcentagem de cimento de 5% foi para o material de Sapé-Mari 16 Kgf/cm²; para o de Nova Floresta, 5,5 Kgf/cm²; e para o de Cuité, 4,0 Kgf/cm².

O fato de que todos os materiais são solos lateríticos e ferruginosos, não contribui para explicar as diferenças encontradas. No entanto, utilizando o estudo de microestrutura deste trabalho, pode-se propor uma interpretação qualitativa. Estas diferenças são: maior quantidade de microporos no mate

rial de Cuité com relação ao material de Sapé-Mari, menor espessura de óxidos amor_{fos}, e, em alguns casos, presença de cauli_{nita} livre de cobertura com material amorfo no material de Sapé-Mari. Isto significa que o solo, de Sapé-Mari poderá reagir com a cal proveniente do processo de hidratação do cimento mais facilmente, e mais efetiva_{mente} que a água e cimento no solo Cuité que serão envolvidos nos microvazios diminu_{indo} a água para o processo de hidratação, e acumulando gel nos mesmos microvazios que de outra maneira serviriam para promover cimentação entre as partículas do solo.

- c) O comportamento do solo saturado Sapé-Mari, quando submetido ao ensaio triaxial consolidado não drenado, mostra que a função da coesão efetiva versus teor de umidade de compactação é pouco comum e certamente não normal para solos de regiões temperadas. Observando-se a Tabela 7.8 do Capítulo anterior, pode-se ver que a coesão efetiva de cresce com o teor de umidade de compacta_{ção} até uma umidade limite, a partir da qual a coesão efetiva aumenta. A interpreta_{ção} oferecida para este comportamento está baseada na natureza e grau de metaestabili_{dade} do solo de Sapé-Mari. A umidade para a qual se produz a reversão da tendênci_a da coesão, é considerada a umidade crítica, para a qual sob um certo estado de tensões a estrutura do solo é destruída e portanto ocorre ainda uma troca de distribuição de microvazios; estas modificações na estru_{tu}ra são então responsáveis pela reversão da tendênci_a da coesão efetiva.

| amostra Nº | perda de peso a 110 °C, mg | perda de peso, mg goetita caulinita | perda de pe so para cau linita, %. | Caulinita, % | Caulinita análise química, % | Goetita , % | |
|---------------|----------------------------------|---|--|-----------------|------------------------------------|----------------|-------|
| 10 | 6,50 | 25,00 | 37,00 | 3,724 | 37,24 | 46,55 | 24,91 |
| 20 | 7,30 | 15,60 | 37,40 | 3,767 | 37,67 | 75,90 | 15,55 |
| 30 | 5,60 | 15,70 | 51,50 | 5,179 | 51,79 | 51,06 | 15,63 |
| 40 | 7,00 | 31,00 | 37,00 | 3,726 | 37,26 | 72,10 | 30,91 |
| 14 | 12,8 | 17,40 | 44,00 | 4,446 | 44,46 | 40,48 | 17,50 |
| 24 | 21,00 | 11,40 | 40,00 | 4,086 | 40,86 | 37,95 | 11,53 |
| 34 | 24,90 | 9,00 | 46,60 | 4,776 | 47,76 | 32,26 | 9,13 |
| 44 | 14,00 | 23,00 | 32,40 | 3,286 | 32,86 | 31,12 | 23,09 |
| 54 | 13,40 | 20,00 | 48,20 | 4,885 | 48,85 | 45,54 | 20,07 |
| 64 | 36,00 | 19,20 | 53,00 | 5,498 | 54,98 | 50,60 | 19,72 |
| 74 | 35,00 | 21,00 | 36,00 | 3,730 | 37,30 | 38,46 | 21,54 |

Tabela 8.1. Valores do teor de caulinita e goetita para as subfrações tamanho argila e silte.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES

Os resultados da revisão crítica da bibliografia consultada para este estudo, as análises de laboratório executadas e os dados sobre comportamento de engenharia dos materiais estudados, obtidos de trabalhos paralelos conduzidos por outros pesquisadores, permitem apresentar as seguintes conclusões:

- 1) De ponto de vista da engenharia civil, uma definição estrita dos materiais que são produtos de um processo de intemperismo tropical de laterização, não é necessária nem possível, devido a sua grande variedade de comportamento em termos de propriedades de engenharia. Propõe-se o termo solos vermelhos que abrange todos eles e elimina a contínua discussão semântica acarretada pelo termo laterita ou laterítico.
- 2) Da revisão das diferentes classificações em uso no mundo, parece que a mais útil para a engenharia civil é aquela desenvolvida para o estudo dos solos da África e que é baseada na classificação simplificada de D'hoore e correlacionada estatisticamente com algumas propriedades de engenharia. No entanto, esta classificação é considerada como apenas um elemento de guia e não pode ser usada para prognosticar o comportamento de um solo.

lo vermelho em particular.

- 3) O estudo de campo das formações onde ocorrem as jazidas dos materiais estudados, apresenta uma teoria de formação destes materiais que é fortalecida pelos estudos de laboratório concernentes às propriedades intrínsecas dos solos pesquisados.
- 4) As análises de laboratório mostram que os materiais das três jazidas contêm caulinita com grau variável de desordem, goetita, hematita, óxidos de ferro amorfo e óxidos de sílica amorfa, além de parecerem conter alumina amorfa nas frações tamanho argila.
- 5) Apresenta-se um método simples mais limitado para o cálculo dos teores de caulinita e goetita. A comparação dos teores obtidos da análise química e da análise termogravimétrica diferencial permite justificar a afirmativa de que existe sílica amorfa nas subfrações tamanho silte dos materiais estudados.
- 6) Funções de distribuição do teor de sílica, alumina e ferro versus tamanhos das partículas mostram que o teor de sílica versus tamanho das subfrações exibe um máximo para o diâmetro médio correspondente ao tamanho silte. O teor de alumina aparece como constante em todas as frações, indicando que a caulinita forma parte de todas elas em agregações cimentadas pelos materiais amorfos. O teor de ferro para as subfrações da fração solo é constante até o tamanho médio correspondente a areia fina, mas incrementa substancialmente para o tamanho médio correspondente a areia grossa. Na fração concreção, o teor de ferro é muito maior para a subfração silte que para a subfração argila.

- 7) Há uma diferença marcante entre teor de ferro nas concreções e teor de ferro nos solos. Isto é indicação clara de que o fator mais importante para a formação de concreções é a acumulação de óxidos de ferro.
- 8) A análise de microscopia eletrônica de varredura permitiu mostrar as diferenças microestruturais entre os materiais estudados. Propõe-se que tanto nos solos como nas concreções um elemento de grande importância é a quantidade e distribuição do diâmetro dos vazios. Estes não só influenciam o grau de metaestabilidade do material, mas são uma variável que influencia a precipitação dos materiais em solução.
- 9) As microfotografias obtidas permitem pela primeira vez visualizar a estrutura interna dos óxidos de ferro pré-hematita. Esta estrutura exibe certo grau de cristalinidade. Sua deposição em camadas muito diferenciadas é uma indicação das trocas de umidade do material.
- 10) Nestes materiais não existe correlação entre porcentagem ou tipo de argilomineral e área específica. Sugere-se que isto se deve a que área específica nestes materiais não é só proveniente do argilomineral, mas dos óxidos amorfos presentes.
- 11) Finalmente, a análise das propriedades de engenharia, em termos das propriedades intrínsecas dos materiais estudados, ilustra as limitações que ocorrem quando se trata de explicar mecanismos de comportamento prescindindo destas propriedades intrínsecas.

CAPÍTULO 10

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A complexidade do problema relacionado com o estudo de solos vermelhos tem desafiado inúmeros pesquisadores; prova disto é a abundância de trabalhos de pesquisa neste campo. É então inevitável que num trabalho limitado como o presente as sugestões para pesquisas futuras sejam inumeráveis. No entanto, a seguir se indicam algumas que, na opinião do autor, merecem maior importância:

- 1) Estender a pesquisa a outras ocorrências localizadas em regiões climáticas de maior diferença que as encontradas para as desta pesquisa e utilizar a mesma metodologia com propósitos de comparação.
- 2) O estado de deposição dos óxidos de ferro não só é indicação do grau de laterização, mas influencia grandemente as propriedades destes materiais; por isso parece necessário continuar estes estudos com vistas ao desenvolvimento de uma metodologia simples para a diferenciação do tipo de óxido de ferro presente nestes solos.
- 3) Complementar os estudos de micro-estrutura com análise de micro-sonda para o mapeamento dos elementos existentes nela.
- 4) Iniciar estudos de variação de micro-porosidade

em termos quantitativos para avaliar sua influên
cia não só nos processos de deposição dos mate
riais em solução, mas em termos de sua influência
no grau de meta-estabilidade das concreções dos
solos vermelhos.

- 5) Prosseguir os estudos das propriedades de engenharia
com suficiente detalhe para o correlacionamento
com as propriedades intrínsecas.
- 6) Iniciar estudos de simulação de percolação para
verificar as condições de mobilização dos compone
ntes dos solos vermelhos e estudar a influência
desta mobilização nas propriedades de engenharia.
Ao mesmo tempo, estudar as condições sob as quais
se produzem mudanças químicas que alteram as prop
riedades destes solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Winterkorn, H. F. Macromeritic Liquids ASTM, 1939.
2. Little, A.L. Definition, Formation and Classification (General Reporter) Proc. Sp. Sess. Eng. Properties of Lateritic Soils Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering México 1969.
3. Gidigasú, M.D. The importance of soil genesis in the engineering classification of Ghana Soils. Eng. Geol. 5. P. 117-161. 1971.
4. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Especificações de base e sub-base estabilizadas granulometricamente com utilização de solos lateríticos. ES - P.47/74, Resolução nº 395/74 do Conselho Administrativo do D.N.E.R., sessão nº 10 de 8/3/74.
5. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem. I.P.R. Seminário sobre laterita, solos lateríticos e solos expansivos. 13 a 17 de janeiro de 1957 (inédito).
6. Buchanan, T.F.A. Journey from Malabar through the countries of Mysore, Canara and Malabar, vol 2, PP 463-460 London East India Company, 1897.
7. Ferreira, H. O conceito de laterite na engenharia civil. Laboratório de Engenharia Civil de Angola. Publ. nº 96, Luanda 1963.
8. Holland, T.H. On the constitution, origin and dehydration of laterite. Geol. Mag., nº 10, Vol. 4, 1903.
9. Warth, E.H. e Warth, F.J. The composition of indian laterite. Geol. Mag., nº 10, Vol. 4, 1903.
10. Fermon, L.L. What is a laterite ?. Geol. Mag., nº 8, Vol. 5, 1911.
11. Lacroix, A. Laterites de La Guinee. Nouv Arch du Muséum d'Hist Nat. 5eme serie C Y, 2eme fasc., Paris, 1963.

12. Harrassowitz, H. Laterite, Fortschritte der Geologie and Paleontologie, Vol. 4, p. 253-566, 1926.
13. Martin, F.D. e Doyné, H.C. Laterite and lateritic soil in Sierra Leone. Journal of Agriculture Science, Vol 20. P.135-143.1930. Notes on West African Soils. Gold. Coast D/A Bull 20. Vol. 2, Second Conf. of. W. African Agric. Officies Paper 7,104 - 118, 1930.
14. Winterkorn, H.F. e Chandrasekharan, E.C. Laterite Soils and their stabilization. Highway Research Board, Bull 44, 1951.
15. Morin, W.J. e Parry, W.T., Mineralogy and index properties of some African lateritic residual soils. Proc. of Sp. Session. on Eng. Prop. of Lateritic Soils. Conf. S.M.E.F., 7th Mexico, 1969.
16. Correia, J.A., Antunes, A.M.C. e Teixeira, J.A.P.C. Results of the fractional identification of the three lateritic gravels . Laboratório de Engenharia Civil de Angola. Luanda. 1969.
17. Pendelton, R.L. On the use of the term laterite. Amer. Soil Surv. Bull, 17. 1936.
18. Kellogg, C.E. Preliminary suggestion for the classification and nomenclature for great soil groups in tropical and equatorial regions, Comm. Bur. Soil Sci. Tech. Commun. n° 46, 1949.
19. Du Preez, J.W. Laterite, a general discussion with a description o Nigerian occurrences. Bull. Arg, Congo Belge. n° 40 p. 53-66, 1949.
20. Fox. C.S. Bauxite and aluminous laterite occurrence of India. Geol. Surv. India Man. V. 49, 1923.
21. Road Research Laboratory. Soil Mechanics for Road Engineers. H.M.S.O. London, 1952.
22. Santana, H. Os solos lateríticos e a pavimentação. Associação Brasileira de Pavimentação. A.B.P., XI Reunião Anual, 1970.
23. Alexander, L.T. e Cady, J.C. Genesis and hardening of laterite in soils. U.S. Dept. of Agric, Washington Bull. 1282, 1962.

24. Grant, K. Laterites, ferricretes, bauxites and silcretas, 2nd International congress of the International Association of Engineering Geology, Vol. 1, 1974.
25. Soil Conservation Service. Soil Classification: A comprehensive system (7th Approximation). U.S. Govt. Print Office, Washington D.C., 1960.
26. De Graft-Johnson, J. W. S. e Bhatia, H. S. Engineering Characteristics of laterite soils (General Report) Proc. Sp. Sess. Eng. Props. Lateritic soil Int. Conf. S. M. F. E. 7th Mexico, 1960.
27. Tyrrel, G. W. The principles of Petrology. Editora Continental, México, 1960.
28. United States Agency for International Development. Laterite and lateritic Soils and Other Problem Soils of Africa. Report prepared by Lyon Associates. Inc. Building and Road Research Institute, Kumasi, Ghana, 1971.
29. Medina, J. Formação dos solos. Notas de aula COPPE.URFJ, 1971.
30. Leinz, V. e Amaral, S.E. Geologia Geral. Companhia Editora Nacional, São Paulo, 1969.
31. Maignien, R. Review of Research on Laterites. Natural Resources Research IV, United Nations Ed. Sci. and Cult. Org. (UNESCO) 1966.
32. Lake, P. The Laterite of South Malabar. Mem. Geol. Surv. India, Vol. 24, 1890.
33. Prescott, V. A. and Pendelton, R.L. Laterite and Lateritic Soils. Commonwealth Bur. Soil Sc Tech. Communication n° 47, 1952.
34. Pratas, M.J. Estudo da laterização na baixada Jangamo. Publicação n° 75, Lourenço Marques, 1964.
35. Harrison, J.B. The residual earths of British Guiana commonly termed laterite. Geol. Mag., Vol. 1, 1910.
36. Scrivenor, J.B. Laterites. Geol. Mag. Vol. 57 p 24, 1930.
37. Norton, S.A. Laterite and Bauxite formation. Econ. Geol. Vol. 68, n° 3, 1973.

38. Garrels, R.M. and Christ, C.L. Solutions, Minerals and Equilibria. New York, Harper & Row, 1965.
39. Valetton, I. Bauxites. Amsterdam Elsevier Pub. Co. 1970.
40. Hamilton, R. Microscopic studies of laterite formation in Ghana. In: A. Songerins (Ed.) Soil Micromorphology., Amsterdam, Elsevier, 1964.
41. Mello, F.B. e Teixeira, A.H. Mecânica dos solos, Vol I. Publicação nº 137, E.E.S.C. Universidade de São Paulo, 1967.
42. Gidigasú, M.D. Parameters for classification of fine grained laterite soils of Ghana. Sponsored by Committee on Exploration and Classification of Earth Materials presented at the 50th Annual Meeting.
43. Pendelton, R.L. Sharasuvana, S. Analyses of some siamese laterites. Soil Sci. Tech. Comm. 47, 1952.
44. Arulanandan, K. Classification, engineering properties and behaviour of laterites. Proc. Sp. Sess Eng. Prop. of Lateritic Soils. Int. Conf. S.M.E.F. 7th Mexico 1969.
45. Ruddock, E.C. Residual soils of the Kumasi district. Geotechnique 17, 359 - 377, 1969.
46. Vallergera, B.A. Vantil, C.J. e Rananand, N. Engineering properties of lateritic materials used in Thailand road Construction. Proc. Sp. Sess. Eng. Props. Lateritic Soils. Int. Conf. S.M.E.F. 7th Mexico, 1969.
47. Atlan, Y. Classification géotechnique routière des sols lateriques Ivoiriens. Revue Générale des Routes et des Aérodrômes. 170.
48. Malomo. S.S. Engineering Characteristics of Laterites. Tese de Master of Science in Engineering Geology and Geotechnics. Departament of Earth Sciences, Universitu of Leeds, 1974.
49. Medina, J. As lateritas e sua aplicação na pavimentação. ABPv. II Reunião Anual, Rio de Janeiro, 1961.
50. Assunção, R.G. Viagem de estudos, na França e África Ocidental Francesa. ARB-BT, nº 7.

51. Souza, M.L. Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis. DNER 1966.
52. Pimenta, A. Solos lateríticos. ABPv. Rio de Janeiro, 1963.
53. D'Hoore, J.L. Soils map of Africa, Scale 1 to 5.000, 000 explanatony mnograph. Comm. for tech co-op in Africa. Pub. 93, 1964.
54. SUDENE. Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba, levantamento exploratório, boletim técnico nº 15, Recife, 1972.
55. SUDENE. Histograma das precipitações Anuais (1962-1971).
56. SUDENE. Inventário Hidrológico Básico do Nordeste, folha 11, 1972.
57. Beurlen, K. Introdução a Estratigrafia Geral e Comparada. Es pansão Gráfica. Recife, 1964.
58. IBGE. Enciclopédia dos Municípios Brasileiros, 1958.
59. British Standards Institution, Methods of Testing Soils for Civil Engineering Purposes: 1377. 67, The Institution, London, 1967.
60. Medina, J. Mineralogia das Argilas. Notas de Aula COPPE UFRJ. 1971.
61. Santos, P.S. Tecnologia de Argilas. Publicação da Universidade Federal da Paraíba, Vol. 1, 1966.
62. Perkin Elmer, Analytical Methods for atomic Absorption Spectrophotometry. Connecticut, USA, 1966.
63. Bernal, B. A New Method for Deomposition and Comprehensive Analyses of Silicates by Atomic Absorption Spectrometry.
64. Kolthoff and Santel. Textbook of Quantitative Minorganic Analises 1967.
65. Stanton Redcroft. Simultaneous thermogravimetry and differential thermal analysis. Technical Information sheet nº 4, Stanton Redcroft, London 1973.
66. Technical Equipement CorPoration. 917. Acoma Street, Denver 4, Colorado. E.E.U.U.
67. Stanton Redcroft. Copper Mill Lane, London SW 17 OBN, Inglaterra.

68. Pichler, E. Argilas, Revista Cerâmica, Nº 12. Vol. 3, São Paulo, 1956.
69. Cabrera, J.G. e Smalley, I.J. Particle association in compacted kaolinite. Nature, 222, 80 - 81, 1969.
70. Cabrera, J.G. The influence of compaction on the structure of clays. Proceedings Geological Society. Regional Meeting. Leeds, 1971.
71. Smalley, I.J. e Cabrera, J.G. The shape and surface texture of loess particles. Geol. Soc. of America Bulletin 81, 1591 - 1595 - 1970 e 82, 2361 - 2364, 1971.
72. Bocquier, G. e Nabovic, Lj. Utilisation de la microscopie electronique em pédologie. Cah ORSTOM. Ser. Pedol Vol. X, nº 4, 411-434, 1972.
73. Souza Santos, P. e Cruz, P.E.N. Área específica de algumas argilas em cerâmica branca. Revistas Cerâmica ... nº 66, vol.16, 1971.
74. Souza Santos, H.L.S. Microscopia Eletrônica de argilas brasileiras utilizadas na Indústria Cerâmica de São Paulo. Revista Cerâmica nºs 47 e 48, vol 12, 1960.
75. Diamond, S. e Kinter, E.B. Gravimetric determinatin of monolayer glycerol complexes of clay minerals. N.A.S., N.R.C. 5th Conference on Clays and Clay Minerals, Pub. 566, 318-347, 1968.
76. Marinho, R.L. Estudo da Variabilidade Estatística de Ensaio de Classificação de Solos. Tese M.Sc. Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.
77. Ferro, J. G. O. A influência da Cal nas Propriedades de Engenharia de Solos Lateríticos. Tese M.Sc. Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 1976.
78. Bezerra, L. A Durabilidade de Solos Lateríticos Estabilizados com Cimento e Aditivos. Tese M.Sc. Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 1976.
79. Borba, G.R. Propriedades de Resistência de um Solo Vermelho do Estado da Paraíba. Tese M.Sc. Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 1975.

APÊNDICES

Apêndice A

MÉTODOS DE ANÁLISE QUÍMICA

A.1. Determinação da SiO_2

- 1.0. Método por espectrofotometria de absorção atômica. Preparação da solução.
- 1.1. Pesar cuidadosa e exatamente 0,1000g da amostra moída a 200 mesh e passar para o frasco de Teflon.
- 1.2. Juntar 4 gotas de HNO_3 concentrado, 10 gotas de HCL concentrado e 6 ml de H.F a 40%, medindo com a proveta de plástico.
- 1.3. Fechar bem o frasco de Teflon, colocar em uma estufa elétrica previamente aquecida a 110°C .
- 1.4. Deixar em digestão a 110°C durante 30 minutos.
- 1.5. Retirar da estufa e deixar esfriar.
- 1.6. A frio, abrir o frasco e acrescentar cerca de 50ml de H_2O destilada e 2,5g de ácido bórico e agitar com um bastão de Teflon até dissolução quase total.
- 1.7. Transferir a solução para um balão volumétrico de 200ml, lavar com H_2O e completar o volume do balão.
- 1.8. Passar imediatamente a solução para um frasco de polietileno com tampa rosqueada a fim de evitar o ataque de sílica no balão de vidro.
- 1.9. Levar o frasco de polietileno diretamente ao capilar de aspiração do espectrofotômetro de absorção atômica e efetuar a leitura da absorção.
- 1.10. Levar o valor da absorção à curva de calibragem e determinar a concentração em $\text{mg SiO}_2/\text{litro}$.
- 1.11. Relacionar a concentração $\text{mg SiO}_2/\text{litro}$ com o peso da amostra e o balão volumétrico original (item 1.0 a 1.6) e calcular $\text{SiO}_2\%$.

$$\%SiO_2 = (mgSiO_2/litro) \times 10^{-4} \times \frac{ml \text{ bal\~ao original}}{g. \text{ amostra}}$$

$$\%SiO_2 = (mgSiO_2/litro) \times 0,2$$

$$\%SiO_2 \times 0,46744 = Si$$

2.0. Curva de Calibração

- 2.1. Carregar uma bureta de 50 ml com alíquota da solução-padrão 1.000 p.p.m. SiO_2 (S-417) e transfira volumes de 50-40-30-20-10 e 5 ml para uma série de balões volumétricos de 100ml.
- 2.2. Completar o volume dos balões com H_2O , agitar e transferir para uma série de frascos de polietileno, marcando as respectivas concentrações em p.p.m. SiO_2 /litro.
- 2.3. Preparar uma amostra em branco, como referido no ítem 1.1.
- 2.4. Levar cada solução padrão diretamente ao capilar da aspiração do espectofotômetro de absorção atômica e fazer a leitura das respectivas absorções.
- 2.5. Construir um gráfico em papel mono-logarítmico, marcando as concentrações em $mgSiO_2$ /litro no eixo horizontal e as absorções no eixo vertical logarítmico.

3.0. Soluções usadas

Padrão Sílica

- 3.1. Pesar exatamente 1,000g de SiO_2 p.a., previamente calcinada a $1.000^{\circ}C$ e transferir para o frasco de Teflon.
- 3.2. Juntar 4 gotas de HNO_3 d = 1,40 e 10 gotas de HCl d = 1,19.
- 3.3. Juntar 60ml de HF a 40% medindo com uma proveta de plástico. Misturar.
- 3.4. Fechar o frasco de Teflon, atarraxar a tampa, apertar fortemente com a mão.
- 3.5. Colocar o frasco de Teflon em uma estufa elétrica previamente aquecida a $110^{\circ}C$, deixar em digestão durante 30 minutos.
- 3.6. Retirar da estufa e esfriar por imersão em água corrente, ou melhor, colocar no refrigerador.

- 3.7. Quando frio, desatarraxar a tampa, acrescentar 25,00g de H_3BO_3 , agitar com um bastão de Téflon para dissolver parcialmente.
- 3.8. Passar a solução para um balão volumétrico de 1.000ml, lavar com bastante água, agitar até completar a dissolução, deixar esfriar e completar o volume do balão, agitar e transferir imediatamente para o frasco de polietileno.

A.2. Determinação de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , MnO , e K_2O

- 1.0. Pesar 0,500g amostra, moída a 200mesh e colocar em um becher de Teflon.
 - 1.1. Atacar com HCl concentrado, a fim de dissolver a amostra.
 - 1.2. Juntar 20ml de HF e levar à chapa quente até secar.
 - 1.3. Adicionar, em seguida, 10 ml de HCl e algumas gotas de HNO_3 , a fim de melhor dissolução de resíduo. Quando existir muito resíduo insolúvel colocar cerca de 5ml de HNO_3 .
 - 1.4. Colocar na chapa quente até secar.
 - 1.5. Adicionar 5 ml de HCl concentrado e aquecer. Quando a amostra estiver dissolvida, diluir com água destilada.
 - 1.6. Levar à chapa quente, cobrir com vidro de relógio e deixar ferver até dissolução total do resíduo.
 - 1.7. Deixar esfriar.
 - 1.8. Passar para balão de 250 ml por meio de filtração e completar o volume com água destilada.
- OBSERVAÇÃO: No papel de filtro não deve ficar nenhum resíduo.
- 1.9. Levar o balão ao espectrofotômetro de absorção atômica e efetuar a leitura da absorção.
 - 1.10. Levar o valor da absorção a curva de calibragem e determinar a concentração em mg/litro.
 - 1.11. Relacionar a concentração mg/litro (p.p.m.) com peso da amostra e o balão volumétrico original, e calcular: os elementos em % que é igual:

$$(\text{mg/litro}) \times 10^{-4} \times \frac{250}{0,5}$$

A.3. Determinação de FeO

- 1.0. Pesar exatamente 0,500g da amostra, moída a 200mesh e passar para cadinho de platina (cap. 50ml).
- 1.1. Juntar 1 a 2ml de água e misturar,
- 1.2. Juntar 10 ml de H_2SO_4 a 50%.
- 1.3. Juntar aproximadamente 5 ml de HF concentrado e tampar o cadinho, vedando bem com a tampa.
- 1.4. Levar o cadinho ao fogareiro elétrico e elevar gradualmente a temperatura até fervura lenta, mantendo durante 10 minutos.
- 1.5. Preparar um becher de 400 ml contendo 300ml de solução recém-preparada de ácido (sulfúrico + bórico + fosfórico).
- 1.6. Retirar o cadinho tampado do fogareiro e passar para o becher.
- 1.7. Juntar 3 gotas de difenilamina indicador a 0,1%.
- 1.8. Titular com $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, N/10, até viragem azul-violeta, anotando o gasto como "K" ml.
- 1.9. Cálculo:

$$K \times 0,0071846 \times 200 = \text{FeO}\%$$

$$K \times 1,4369 = \text{FeO}\%$$

Soluções Usadas:

Ácido sulfúrico, H_2SO_4 , d = 1,84 a 50%v/v.

Solução ácido sulfúrico + bórico + fosfórico.

a) Medir 300 ml de água recém-fervida e fria, passar para becher de 400 ml.

b) Juntar 10 ml de H_2SO_4 a 50%.

c) Juntar 5 ml de H_3PO_4 d = 1,71.

d) Juntar 25 ml de solução saturada de ácido bórico.

Solução de indicador difenilamina a 0,1% p/v, feita em H_2SO_4
 $d = 1,84$.

Solução titulada de KCr_2O_7 (permanganato de potássio) N/10.

Solução saturada de ácido bórico, H_3BO_3 .

a) Pesar 30g de H_3BO_3 em becher de 600 ml.

b) Juntar 500 ml de água quente, agitar para dissolver, dei
xar esfriar.

c) Escorrer a solução limpa e decantada.

A.4. Determinação de SO_3

- 1.0. Pesar 1g da amostra e fundir a 1000°C em cadinho de platina com 10g de carbonato de sódio.
- 1.1. Colocar em uma caçarola com água destilada até a metade do cadinho.
- 1.2. Levar à chapa quente até dissolução.
- 1.3. Retirar o cadinho com pinça e lavar com água dentro da própria caçarola.
- 1.4. Filtrar e lavar com Na_2CO_3 a 2%. O filtrado acidifica-se com HCl concentrado usando indicador metil orange.
- 1.5. Levar à chapa quente até secura.
- 1.6. Esfriar e umedecer o resíduo com HCl concentrado e aproximadamente 6 gotas de HNO_3 concentrado.
- 1.7. Colocar 150 ml de água destilada. Ferver.
- 1.8. Filtrar a quente em papel de filtro S.S fita branca..
- 1.9. Levar o resíduo com HCl 2% quente; retirar todo o material com policial das paredes da caçarola.
- 2.10. Do filtrado resultante determinar o sulfato. O resíduo é Sílica.
- 2.11. Ao filtrado resultante colocar o indicador metil orange e amônia, gota a gota até viragem.
- 2.12. Aquecer a fervura e juntar gota a gota 10 ml de cloreto de bário. Se precipitar muito, adicionam-se mais 10 ml de cloreto de bário.
- 2.13. Deixar em repouso 4 horas na chapa quente, filtrar e calcinar.

2.14. Calcular:

Ex: 1g - 0,02g BaSO_4

100 - x . . . x = 2% BaSO_4

F = 0,343 de BaSO_4 para SO_3 $2 \times 0,343 = 0,686\% \text{SO}_3$

A.5. Determinação de CaO

- 1.1. Pesar exatamente 1g da amostra e passar para cadinho de platina previamente forrado com um pouco de Na_2CO_3 anidrido em pó.
- 1.2. Misturar bastante com auxílio de um bastão de vidro pontiagudo. Limpe a ponta do bastão com auxílio de pincel fino.
- 1.3. Levar o cadinho à mufla e calcinar a 1000°C , mantendo esta temperatura cerca de 20 minutos.
- 1.4. Retirar o cadinho da mufla e deixar esfriar.
- 1.5. Destacar a massa fundida e passar para caçarola de porcelana. Cobrir a massa fundida com água.
- 1.6. Cobrir a caçarola com vidro de relógio e adicionar HCl concentrado, gotejando pelo bico da caçarola, cerca de 25ml.
- 1.7. Após cessar a reação violeta, retirar o vidro de relógio e lavar com um jato de água. Ajudar a desagregação da massa, procurando, vez por outra, esmagar a massa com auxílio do bastão de vidro.
- 1.8. Juntar ao cadinho de platina um pouco de HCl e encher com água quente.
- 1.9. Lavar bem o cadinho com frasco lavador de HCl 2% quente, passando a solução para a caçarola.
- 1.10. Levar a caçarola à chapa quente e deixar evaporar lentamente até completar secura (movendo e quebrando a crosta de sal que se forma).
- 1.11. Retirar a caçarola do calor e deixar esfriar.
- 1.12. Juntar 5ml de HCl, molhando todo o resíduo com auxílio do bastão.
- 1.13. Adicionar cerca de 3 gotas de HNO_3 .

- 1.14. Juntar aproximadamente 100ml de água quente e agitar.
- 1.15. Levar a caçarola ao fogareiro elétrico até fervura agitando para dissolver os sais.
- 1.16. Ainda quente filtrar para becher de 400ml, através de papel de filtro textura média, diâmetro 11cm (s.s nº 589), fita branca.
- 1.17. Lavar cerca de 3 vezes com HCl 2% quente e arrastar o resíduo para o funil, raspando ligeiramente com o policial.
- 1.18. Dobrar o papel de filtro e colocar no cadinho de platina. Levar o cadinho à chapa quente até secar.
- 1.19. Calcinar o cadinho a $500-600^{\circ}\text{C}$ até 1000°C , mantendo esta temperatura durante 20 minutos.
- 1.20. Retirar o cadinho do forno e deixar esfriar no dessecador. Pesar rapidamente anotando como P_1 gramas.
- 1.21. Molhar cuidadosamente o resíduo com água e juntar 2 gotas de H_2SO_4 a 50% de 5ml de HF.
- 1.22. Levar à chapa quente até secura.
- 1.23. Aquecer o cadinho no fogareiro elétrico para eliminar o excesso de H_2SO_4 (até haver ausência de nuvens brancas) e levar o cadinho a mufla para calcinar a 1000°C .
- 1.24. Passar para dessecador e pesar novamente o cadinho como " P_2 " gramas. Colocar um pouco de pirossulfato de potássio no cadinho e fundir ao bico de bunsen até que o cadinho fique limpo.
- 1.25. Deixar esfriar e colocar dentro do (filtrado anterior) becher juntamente com 5ml de HCl concentrado.
- 1.26. Levar à chapa até desagregação completa.
- 1.27. Retirar o cadinho dos copos e lavar.
- 1.28. Colocar esta solução em balão de 500ml. Após fria, completar o volume e agitar.
- 1.29. Tomar 100ml desta solução e colocar o indicador bromo-fenol azul, em seguida adicionar 15ml de ácido tartárico (20%) e aquecer.

- 1.30. Colocar, em seguida, 30ml de oxalato de amônio saturado.
- 1.31. Levar à ebulição, adicionar gota a gota, NH_4OH concentrado, até viragem do indicador.
- 1.32. Juntar ácido oxálico a 5% até diminuir o azul intenso. Deixar em repouso quente até decantar (4 horas).
- 1.33. Filtrar a frio em papel S.S fita branca.
- 1.34. Lavar o resíduo com água destilada. O filtrado reservar para dosagem do MgO .
- 1.35. Furar o papel do precipitado e este será dissolvido com H_2SO_4 5%.
- 1.36. Lavar bem com H_2SO_4 5% e para o mesmo becher da precipitação acrescentar 10ml de H_2SO_4 50%.
- 1.37. Levar a ebulição e titular quente com permanganato de potássio N/10 (ml).
- 1.38. Cálculo

$F = 1,4$ de Ca para CaO

$\text{CaO}\% = \text{ml} \times 1,4.$

A.6. Determinação do MgO

- 1.1. Secar um pouco o filtrado resultante da determinação do cálcio.
- 1.2. Acidificar com HCl concentrado. Aquecer um pouco a fim de haver melhor limpidez na solução. Colocar em geladeira.
- 1.3. Após esfriar, juntar aproximadamente de 15 a 20ml de fosfato ácido de amônio. Em seguida, colocar NH_4OH , gota a gota, com agitação até precipitação do magnésio.
- 1.4. Adicionar mais 10ml de amônia em excesso e deixar em repouso por 24 horas aproximadamente.
- 1.5. Filtrar em papel S.S fita branca. Quando a quantidade de magnésio for grande, deve-se fazer uma reprecipitação.
- 1.6. Despresar o filtrado.
- 1.7. Lavar o resíduo com HCl concentrado e HCl 2%, a fim de dissolvê-lo e prepará-lo para mais uma precipitação.
- 1.8. Colocar o indicador bromo-fenol azul.
- 1.9. Diluir um pouco com H_2O destilada e colocar NH_4OH , gota a gota, com agitação até precipitar o magnésio.
- 1.10. Como a reação é exotérmica, para que o magnésio precipite é necessário esfriar a solução.
- 1.11. Adicionar 10ml de NH_4OH e deixar em repouso por 24 horas aproximadamente.
- 1.12. Filtrar em papel S.S fita branca.
- 1.13. Lavar com NH_4OH (1:20). Passar o líquido no becher até limpar completamente.
- 1.14. Colocar o papel com precipitado em cadinho tarado e queimar no fogareiro, caso a mufla esteja em alta temperatura.

1.15. Levar, em seguida, a mufla e deixar atingir 1000°C .

1.16. Esfriar no dessecador e pesar. (P_1).

1.18. Calcular

$$(P_2 - P_1) \times 0,3621 \times 500 = \text{MgO}\%.$$

A.7. Determinação de P_2O_5

- 1.1. Usar uma solução clorídrica de ortofosfato, da qual foram eliminada as interferências, sílica, arsênico, vanádio etc. (solução descrita B).
- 1.2. Tomar uma alíquota de 20ml e passar para balão volumétrico de 100ml.
- 1.3. Colocar água diluindo para 60ml e agitar.
- 1.4. Ajustar a acidez para pH = 4, utilizando NH_4OH ou HCl a 50%.
- 1.5. Agitar, juntar 10ml de molibdato de amônia a 1,5%, agitar, juntar 5ml de $SnCl_2$ diluído e agitar.
- 1.6. Colocar 10ml de sulfito de sódio a 20% e, em seguida, completar o volume com água destilada, agitar.
- 1.7. Transferir alíquota para a cubeta do colorímetro e efetuar a leitura de absorção.
- 2.0. Dados para o colorímetro KLETT SUMMERSON
Filtro vermelho nº 60
Cubeta = 20mm
Solução de referência = água destilada.

Apêndice B

TABELAS DE RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA

| Amostra | Elementos Químicos, % | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------------------|------|------|------|-------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|---------------|---------------|
| | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | FeO | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | Ca | MgO | MnO | P ₂ O ₅ | Na ₂ O | K ₂ O | SO ₃ | Umid. a 110°C | Perdas 1000°C |
| 10 | 35,00 | 32,40 | 0,50 | 18,40 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,10 | 0,20 | 1,20 | 1,50 | 3,40 |
| 11 | 47,50 | 15,20 | 0,45 | 22,20 | 0,90 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,80 | 0,30 | 1,20 | 1,40 | 9,00 |
| 12 | 46,40 | 10,20 | 0,30 | 27,40 | 1,30 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 1,00 | 0,30 | 0,40 | 1,55 | 11,00 |
| 13 | 32,50 | 7,50 | 0,60 | 32,10 | 1,20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,80 | 3,10 | 0,40 | 4,70 | 3,10 | 13,70 |
| 14 | 26,00 | 49,70 | 0,20 | 16,00 | 0,80 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 0,20 | 0,10 | 1,20 | 0,60 | 5,00 |
| 15 | 39,00 | 11,00 | 1,00 | 28,50 | 0,90 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,60 | 3,00 | 0,40 | 0,50 | 2,50 | 12,30 |
| 20 | 40,00 | 11,00 | 0,00 | 30,00 | 1,60 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 1,50 | 1,50 | 13,50 |
| 21 | 40,00 | 8,00 | 0,00 | 32,00 | 1,70 | 1,00 | 0,01 | 0,01 | 0,10 | 0,13 | 0,10 | 2,00 | 1,70 | 14,00 |
| 22 | 44,00 | 9,00 | 0,00 | 28,00 | 1,80 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,13 | 0,20 | 0,20 | 0,80 | 2,00 | 13,70 |
| 23 | 21,00 | 6,30 | 0,00 | 19,00 | 1,00 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 23,20 | 8,95 | 0,20 | - | 6,89 | 13,00 |
| 24 | 40,40 | 32,20 | 0,00 | 15,00 | 1,00 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,25 | 0,10 | 0,20 | 2,00 | 1,27 | 7,35 |
| 25 | 34,00 | 10,70 | 0,00 | 28,00 | 1,10 | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 8,40 | 1,80 | 0,30 | 0,60 | 3,00 | 12,00 |
| 30 | 36,00 | 25,80 | 0,00 | 20,18 | 1,25 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 2,92 | 0,44 | 0,13 | 0,35 | 2,01 | 10,80 |
| 31 | 43,00 | 15,40 | 0,00 | 24,61 | 1,41 | 0,00 | 0,05 | 0,02 | 0,16 | 0,81 | 0,46 | 0,00 | 2,21 | 11,52 |
| 32 | 47,00 | 11,80 | 0,00 | 23,51 | 1,41 | 0,00 | 0,07 | 0,03 | 0,22 | 0,54 | 0,23 | 0,33 | 2,21 | 11,84 |
| 33 | 30,40 | 8,60 | 0,00 | 25,97 | 1,41 | 0,00 | 0,09 | 0,01 | 10,50 | 3,58 | 0,19 | 0,59 | 4,33 | 14,51 |
| 34 | 32,00 | 44,30 | 0,00 | 12,75 | 0,92 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,15 | 0,39 | 0,21 | 0,00 | 1,67 | 7,54 |
| 35 | 30,40 | 28,40 | 0,00 | 23,19 | 1,04 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 0,11 | 1,72 | 0,54 | 0,37 | 2,96 | 10,81 |

Tabela B.1 Composição química das subfrações de solo e concreção das amostra da Jazida Cuité.

| Amostra | Elementos Químicos, % | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|-----------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|
| | SiO_2 | Fe_2O_3 | FeO | Al_2O_3 | TiO_2 | CaO | MgO | MnO | P_2O_5 | Na_2O | K_2O | SO_3 | Umid. a 111°C | Perdas 1000°C |
| 40 | 34,00 | 15,00 | 0,00 | 28,50 | 1,30 | 0,00 | 0,20 | 0,00 | 0,02 | 4,50 | 0,50 | 0,30 | 1,80 | 13,50 |
| 41 | 40,00 | 8,50 | 0,00 | 32,50 | 1,50 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,10 | 0,60 | 0,20 | 0,30 | 2,00 | 14,00 |
| 42 | 42,00 | 10,00 | 0,00 | 28,00 | 1,60 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,13 | 0,50 | 0,30 | 0,50 | 2,00 | 14,00 |
| 43 | 28,00 | 7,00 | 0,00 | 27,00 | 1,30 | 0,00 | 0,30 | 0,00 | 10,00 | 4,10 | 0,30 | 1,50 | 4,70 | 15,00 |
| 44 | 20,00 | 52,70 | 0,00 | 12,30 | 1,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,04 | 0,37 | 0,37 | 1,60 | 1,35 | 10,00 |
| 45 | 22,00 | 29,50 | 0,00 | 21,70 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,00 | 6,00 | 2,15 | 0,50 | 1,00 | 3,60 | 12,30 |

Tabela B.2 Composição química das subfrações de solo e concreção das amostras da Jazida Nova Floresta.

| Amostra | Elementos Químicos, % | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---|--------------------------------|------|--------------------------------|------|------|------|------|-------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|---------------|---------------|
| | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | FeO | Al ₂ O ₃ | TiO | Ca | MgO | MnO | P ₂ O ₅ | Na ₂ O | K ₂ O | SO ₃ | Umid. a 110°C | Perdas 1000°C |
| 50 | Não ficou material (solo) com diâmetro superior a 2,00mm após lavagem | | | | | | | | | | | | | |
| 51 | 44,00 | 8,00 | 0,00 | 20,50 | 2,80 | 0,30 | 0,03 | 0,00 | 0,15 | 0,25 | 0,20 | 0,10 | 1,00 | 13,30 |
| 52 | 44,00 | 9,00 | 0,00 | 28,00 | 2,75 | 0,04 | 0,03 | 0,00 | 0,27 | 0,28 | 0,15 | 0,87 | 1,35 | 12,70 |
| 53 | 32,00 | 8,30 | 0,00 | 28,70 | 1,90 | 0,10 | 0,04 | 0,00 | 10,16 | 1,20 | 0,15 | 0,80 | 2,00 | 14,00 |
| 54 | 20,00 | 45,50 | 0,00 | 18,00 | 2,16 | 1,25 | 0,04 | 0,00 | 0,29 | 0,22 | 0,16 | 0,30 | 1,17 | 10,50 |
| 55 | 25,80 | 31,00 | 0,00 | 21,00 | 1,08 | 0,15 | 0,03 | 0,00 | 5,89 | 1,88 | 0,07 | 0,85 | 1,50 | 10,60 |
| 60 | Não ficou material (solo) com diâmetro superior a 2,0mm após lavagem | | | | | | | | | | | | | |
| 61 | 43,50 | 3,50 | 0,00 | 33,05 | 3,16 | 0,50 | 0,03 | 0,00 | 0,09 | 0,39 | 0,16 | 1,00 | 0,70 | 13,60 |
| 62 | 41,80 | 5,00 | 0,00 | 33,11 | 4,00 | 0,05 | 0,03 | 0,00 | 0,27 | 0,32 | 0,22 | 1,00 | 1,00 | 13,10 |
| 63 | 36,00 | 5,00 | 0,00 | 32,11 | 2,20 | 0,07 | 0,06 | 0,00 | 7,00 | 1,00 | 0,12 | 1,00 | 1,20 | 14,10 |
| 64 | 20,00 | 42,00 | 0,00 | 20,00 | 2,20 | 2,00 | 0,04 | 0,00 | 0,40 | 0,20 | 0,15 | 0,75 | 1,60 | 10,20 |
| 65 | 24,00 | 28,60 | 0,00 | 20,30 | 1,08 | 2,50 | 0,04 | 0,00 | 8,00 | 2,02 | 0,06 | 0,50 | 1,26 | 11,10 |
| 70 | Não ficou material (solo) com diâmetro superior a 2,0mm após lavagem | | | | | | | | | | | | | |
| 71 | 45,00 | 10,15 | 0,00 | 25,95 | 3,58 | 1,25 | 0,05 | 0,03 | 0,15 | 1,75 | 0,70 | - | 0,35 | 11,00 |
| 72 | 36,80 | 14,80 | 0,00 | 28,50 | 4,35 | 0,02 | 0,05 | 0,03 | 0,40 | 0,75 | 0,20 | - | 1,00 | 12,70 |
| 73 | 35,10 | 10,70 | 0,00 | 30,70 | 2,40 | 0,05 | 0,04 | 0,02 | 3,15 | 1,70 | 0,15 | - | 1,40 | 14,10 |
| 74 | 20,00 | 48,50 | 0,00 | 15,20 | 3,00 | 0,05 | 0,06 | 0,05 | 0,55 | 0,40 | 0,15 | - | 1,00 | 10,50 |
| 75 | 19,00 | 39,70 | 0,00 | 18,00 | 0,90 | 0,05 | 0,03 | 0,03 | 5,90 | 3,50 | 0,40 | - | 1,40 | 11,00 |

Tabela B.3 Composição química das subfrações de solo e concreção das amostras da jazida Sapê-Mari

Apêndice C

DIFRATOGRAMAS DE RAIOS-X

Figura C.1. Difrátogramas de raios-X para as subfrações da fração "solo" correspondente a jazida Cuité.

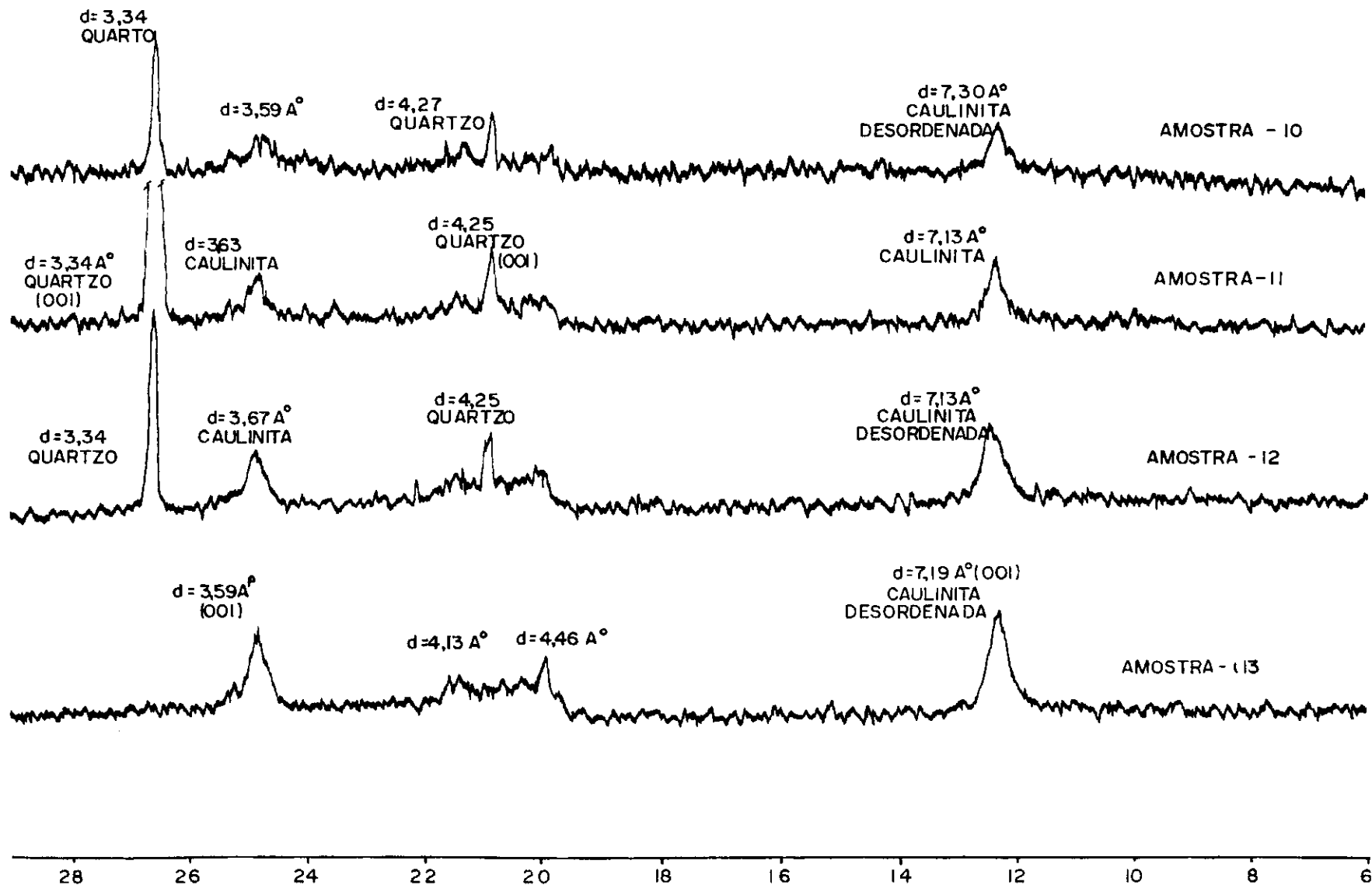


Figura G.2. Difractogramas de raios-X para as subfrações da fração "concreção" correspondente a jaz_i da Cuité.

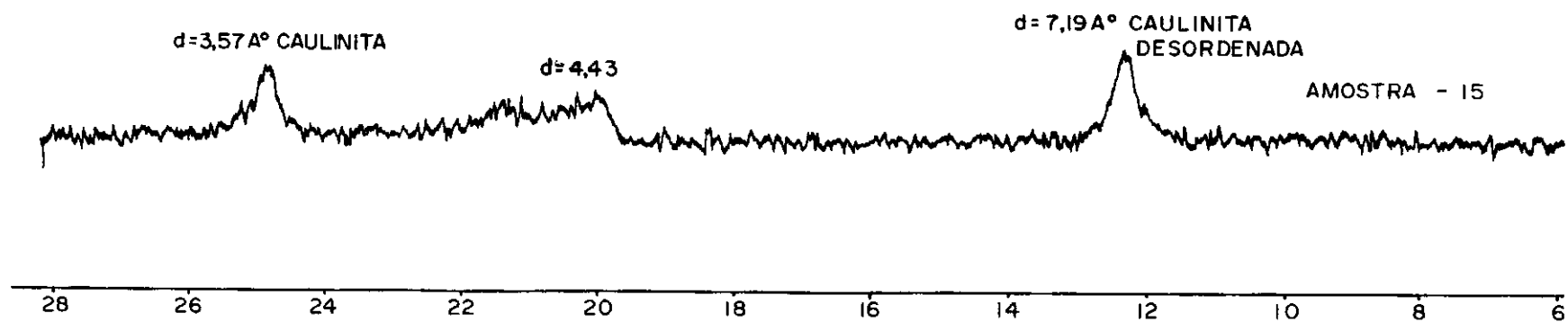
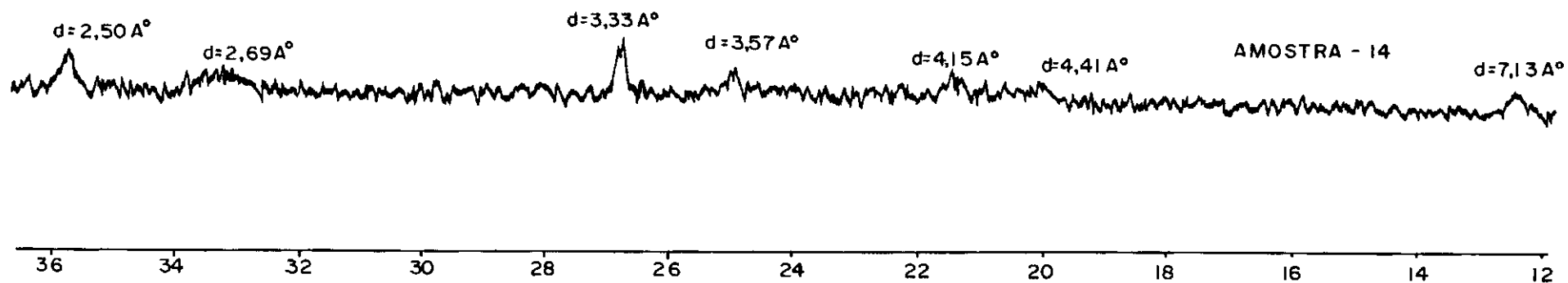


Figura C.3. Difratoograma, de raios-X para as subfrações da fração "solo" correspondente a jazida Cuité.

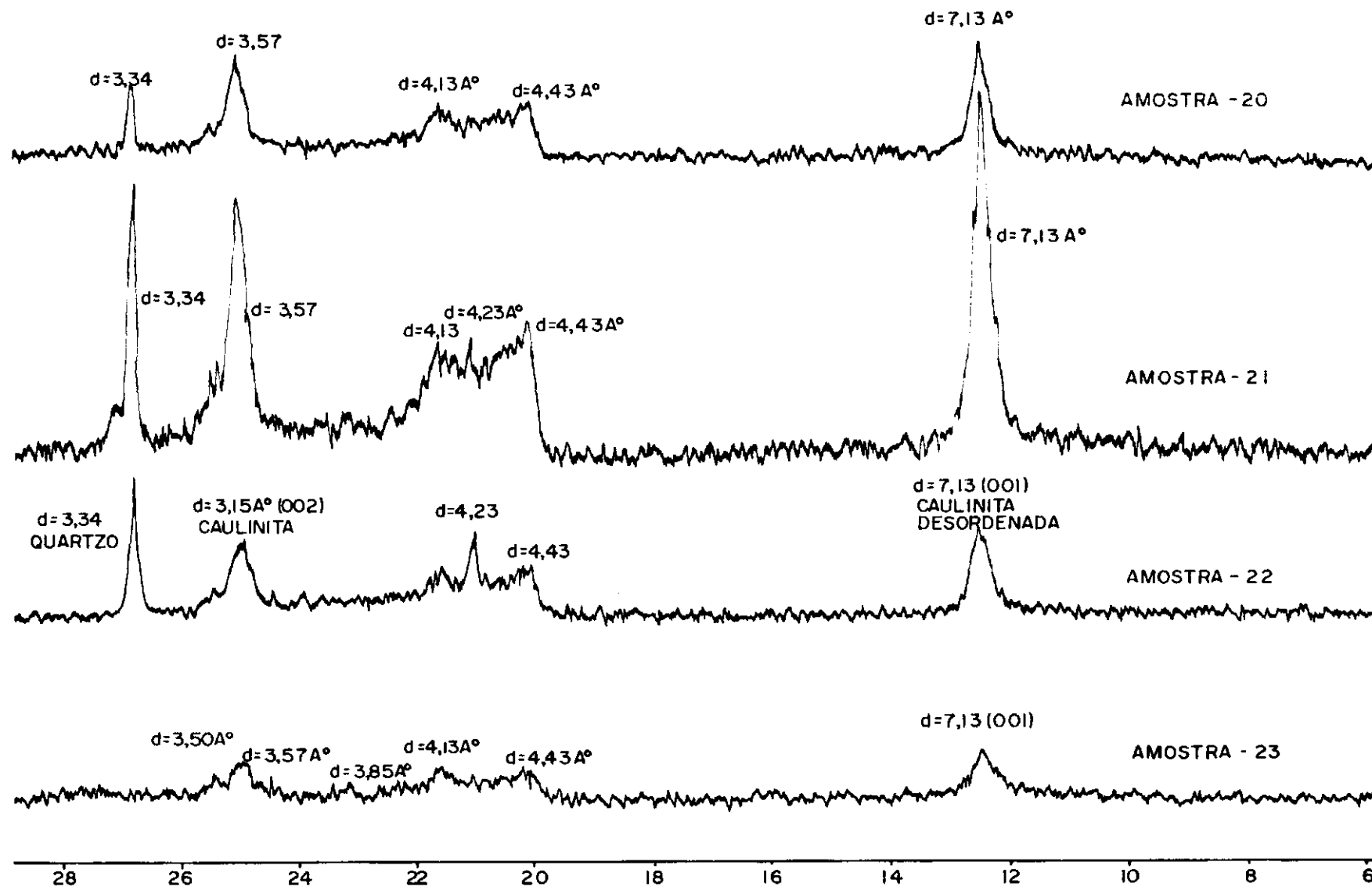


Figura C.4. Difractogramas de raios-X para as subfrações da fração "concreção" correspondente a jazⁱ da Cuité.

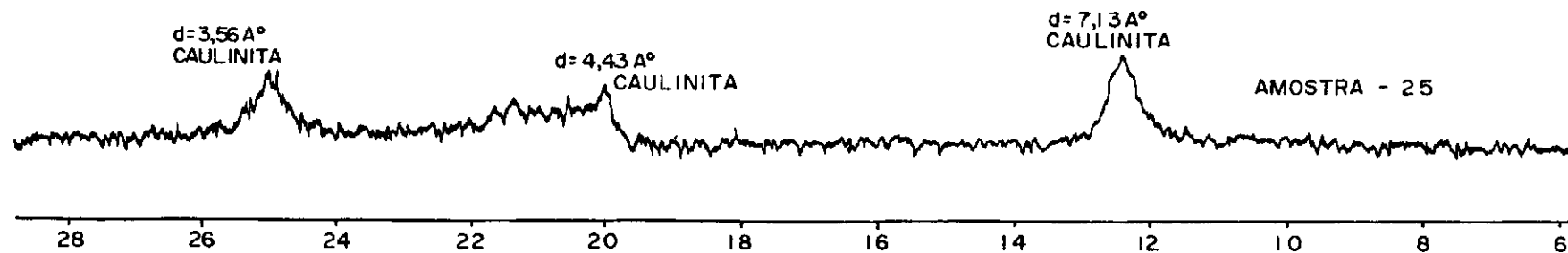
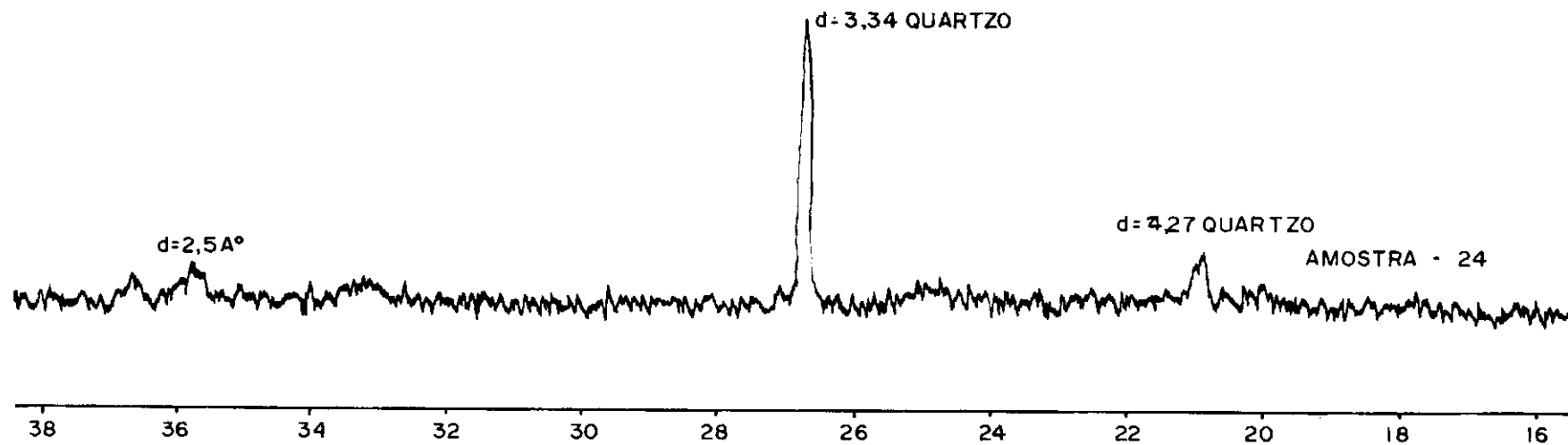


Figura Q.5. Difractogramas correspondente as subfrações da fração "solo" correspondente a jazida Cuité.

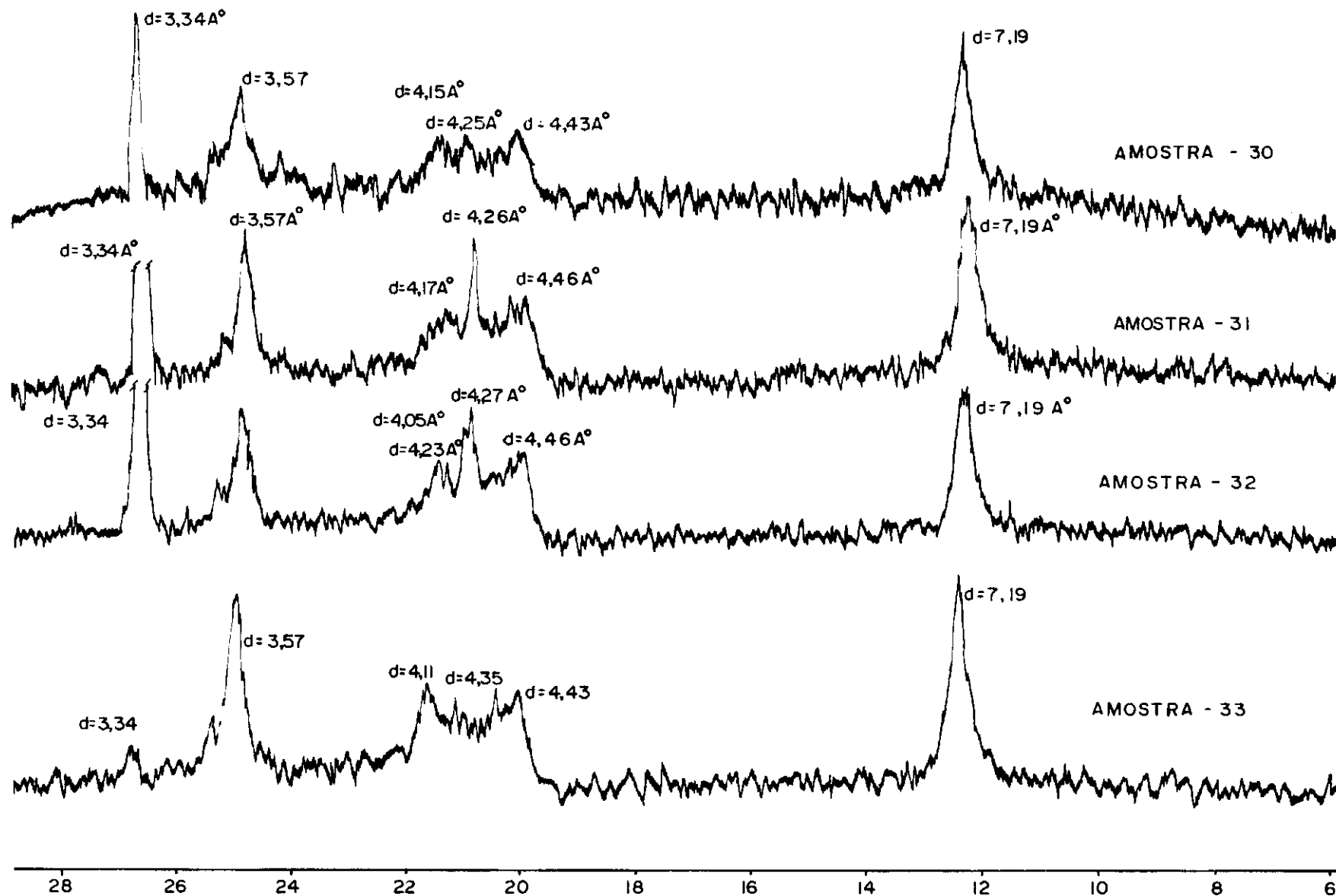


Figura C.6. Difrátogramas correspondente as subfrações da fração "concreção" correspondente a jazi da Cuité.

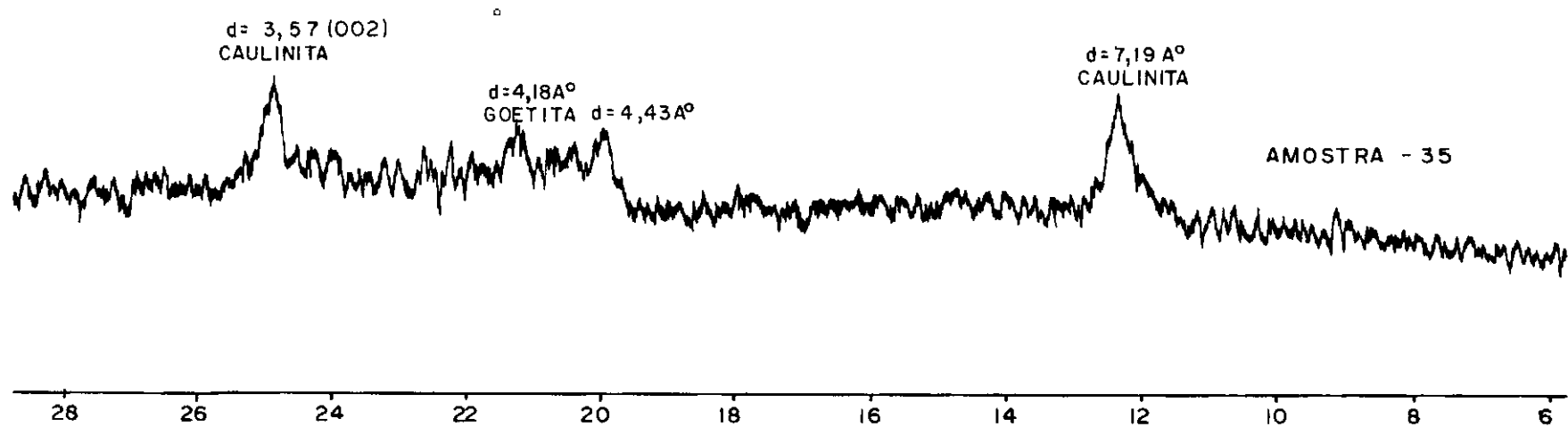
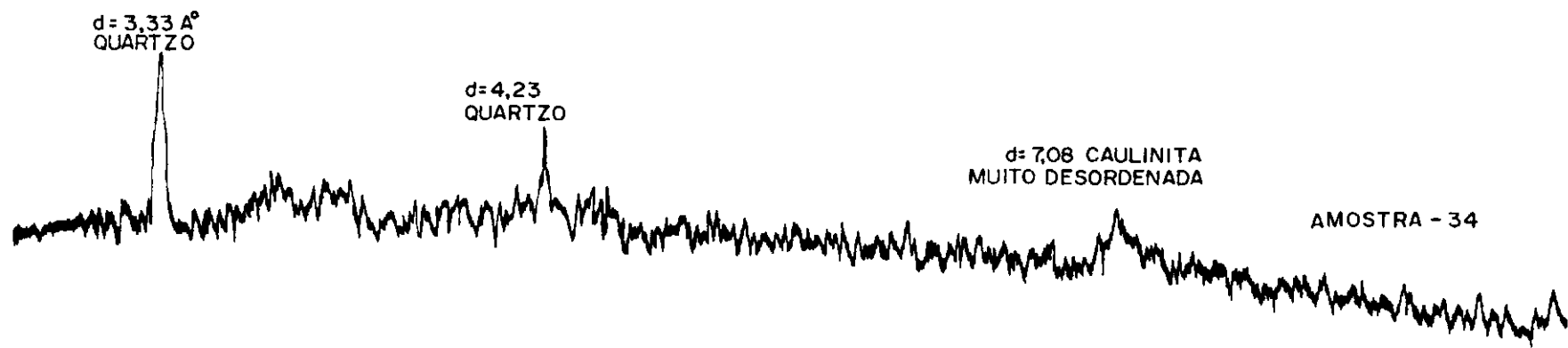


Figura C.7. Difratoigramas de raios-X para as subfrações da fração "solo" correspondente a jazida Nova Floresta.

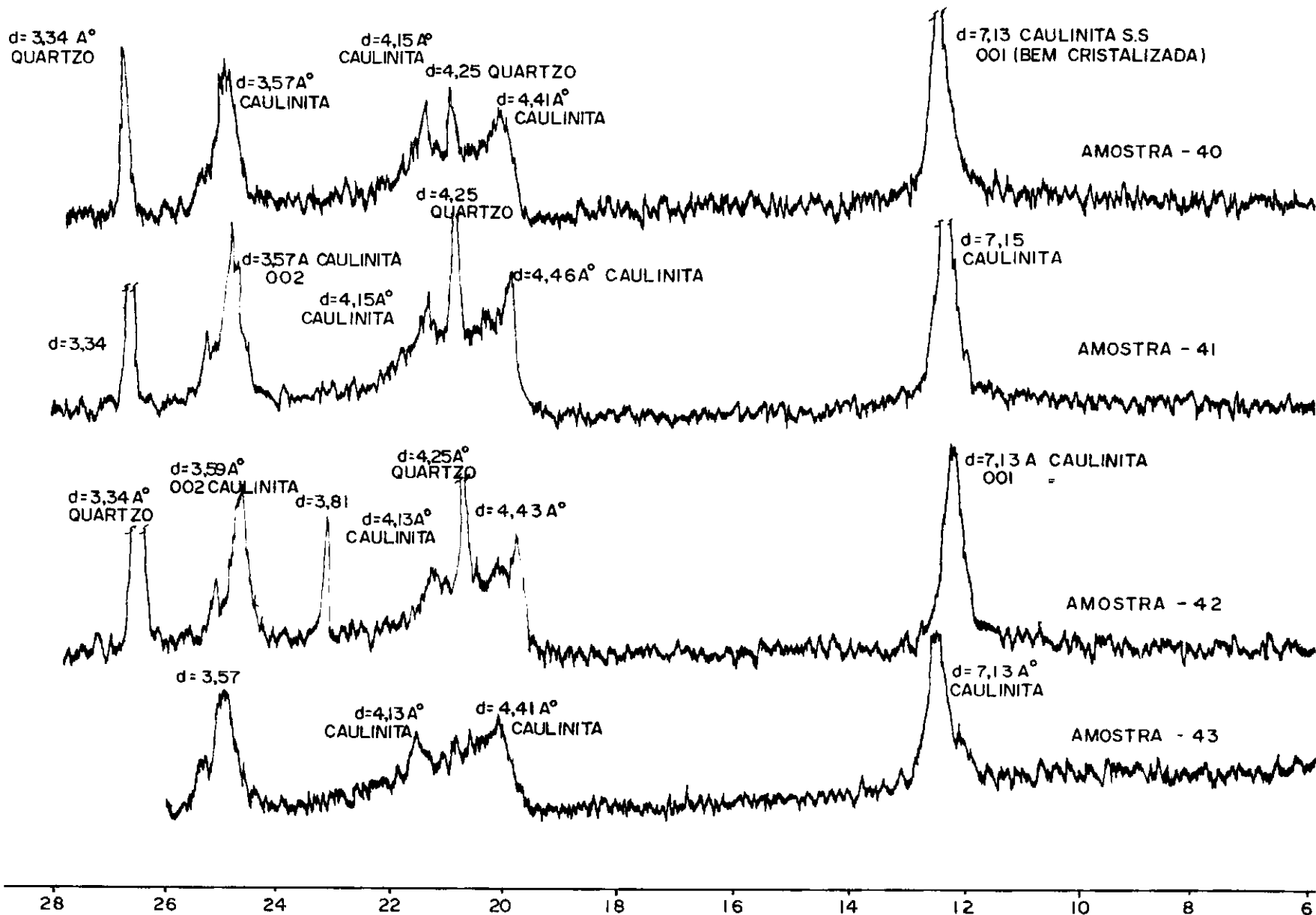


Figura C.8. Difratoigramas de raios-X para as subfrações da fração "concreção" correspondente a jazi da Nova Floresta.

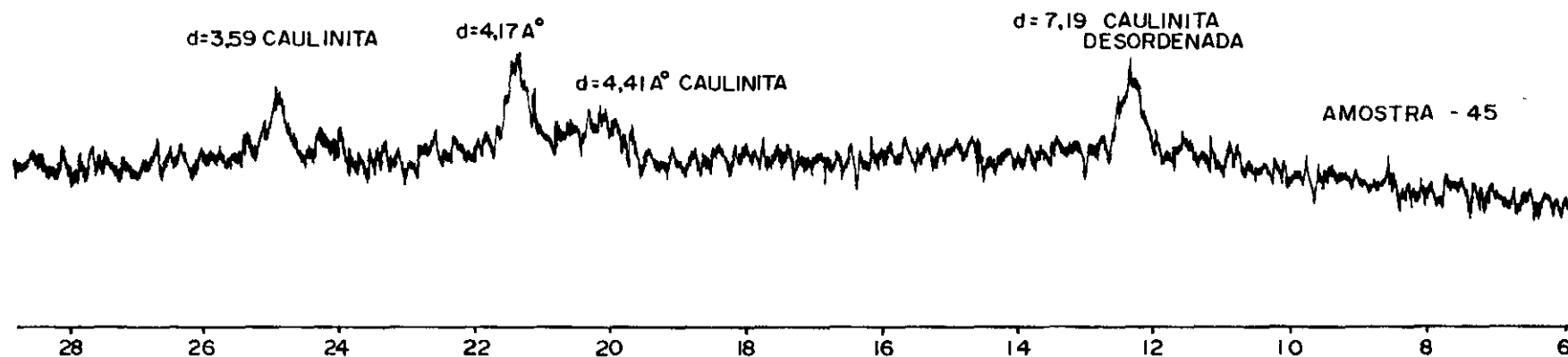
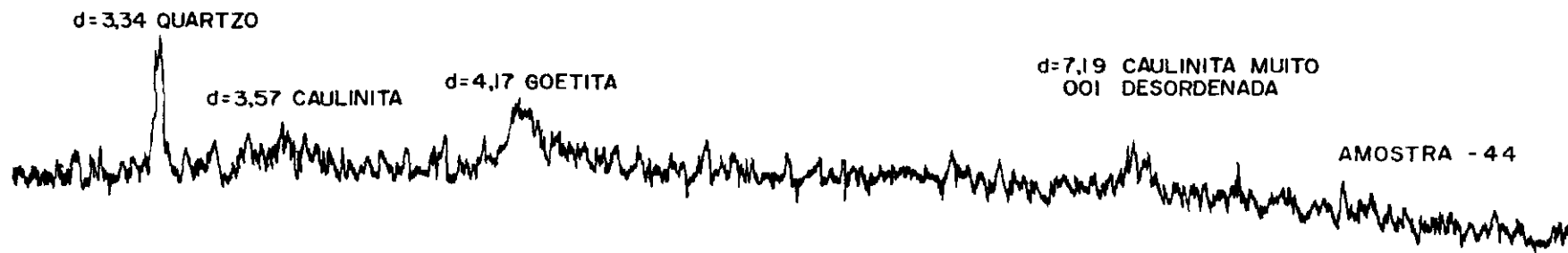


Figura C.9. Difrátogramas de raios-X para as subfrações da fração "solo" correspondente a jazida Sapê-Mari.

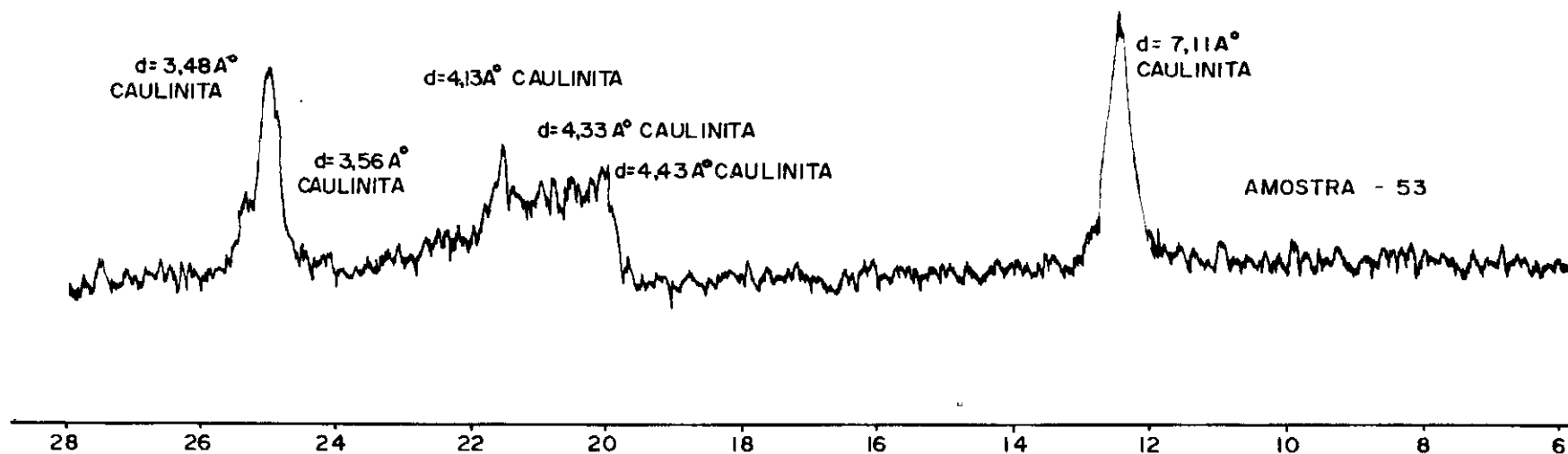
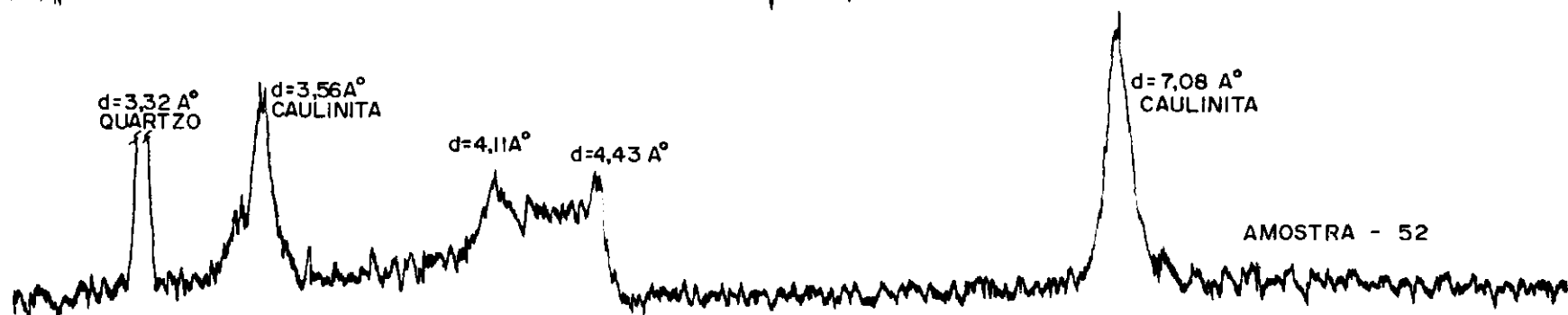
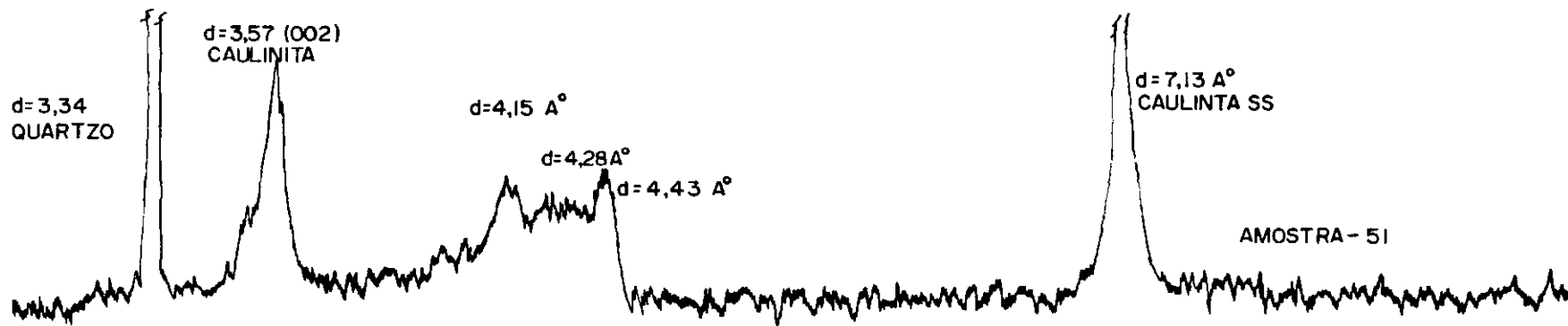
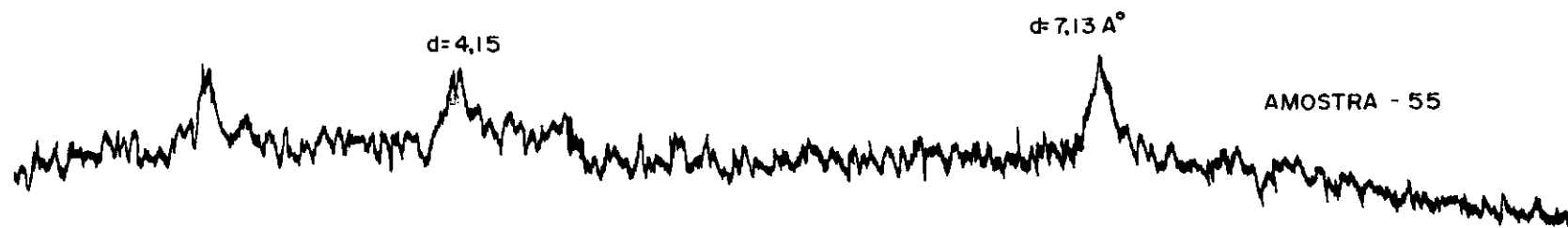
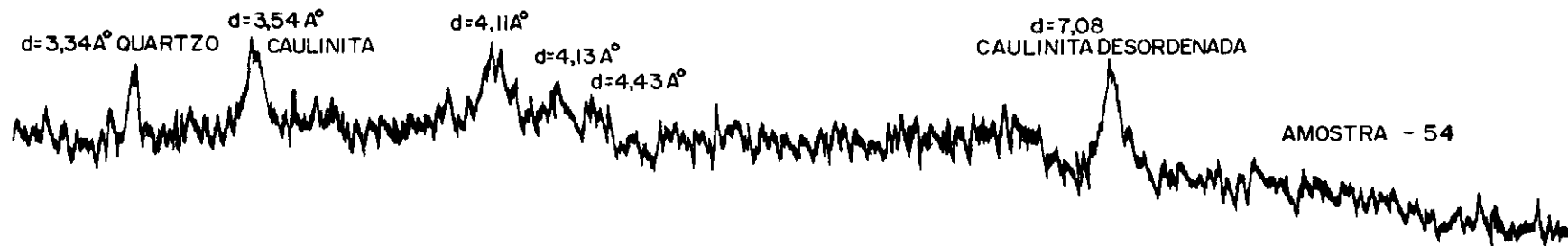


Figura C.10. Difratoograma de raios-X para as subfrações da fração "concreção" correspondente a ja zida Sapé- Mari.



28 26 24 22 20 18 16 14 12 10 8 6

Figura C.11. Difratogramas de raios-X para as subfrações da fração "solo" correspondente a jazida Sapê-Mari.

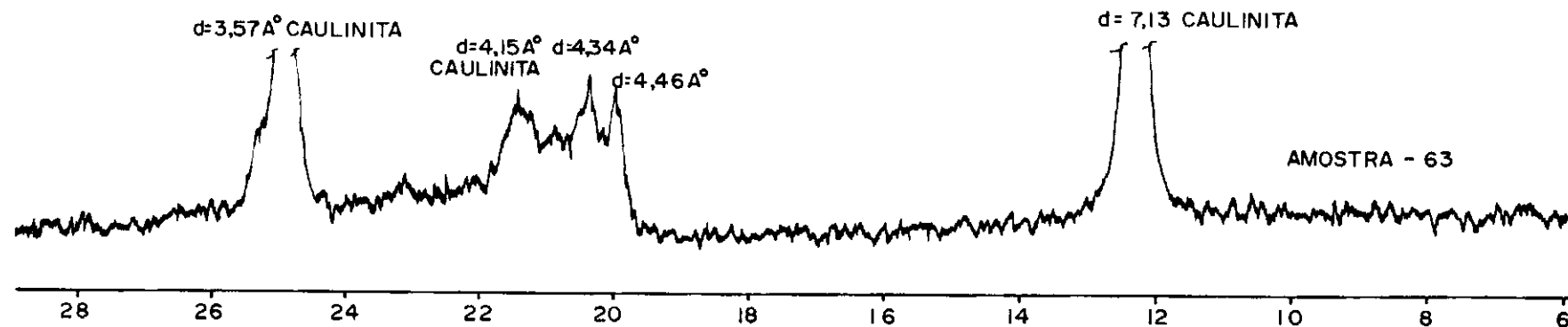
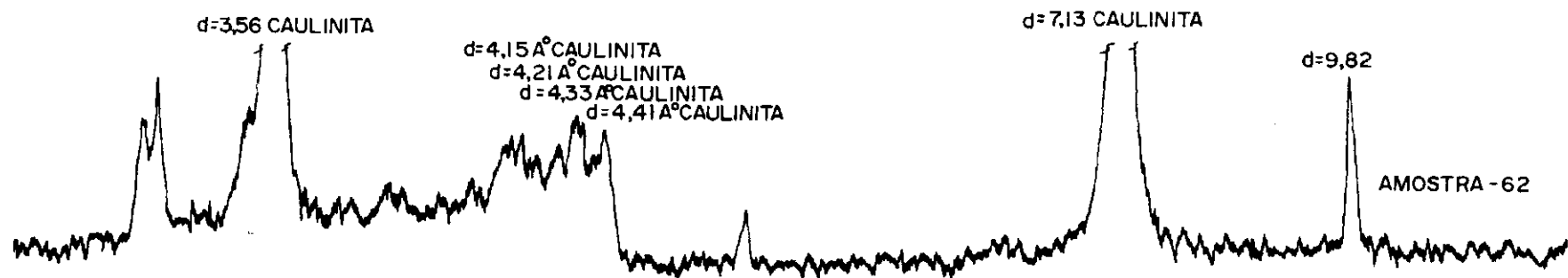
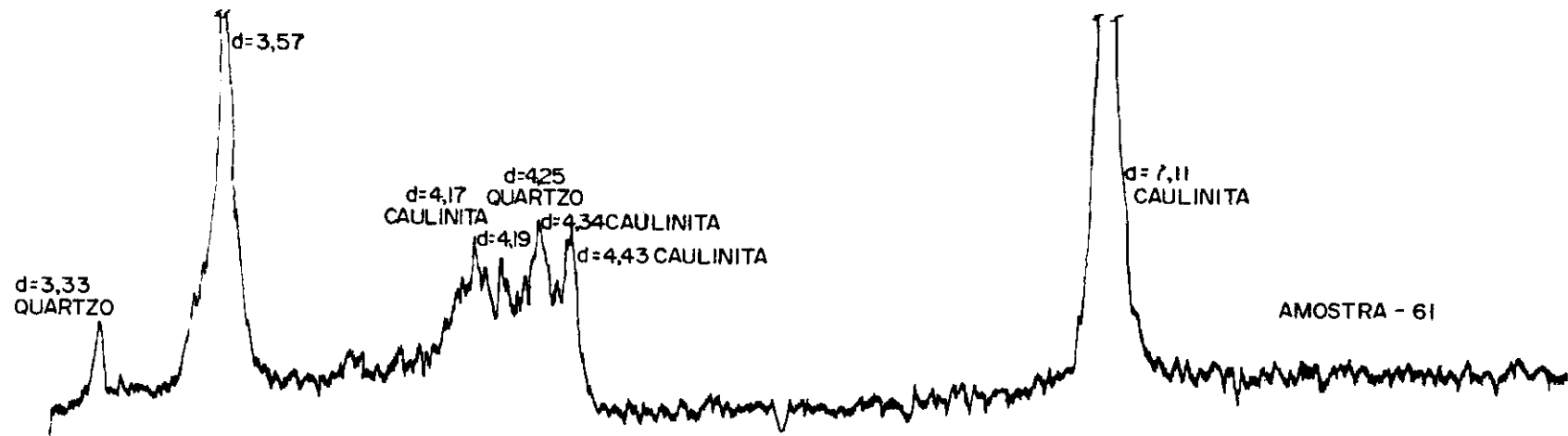


Figura C.12. Difratoigramas de raios-X para as subfrações da fração "concreção" correspondente a jazida Sapé-Mari.

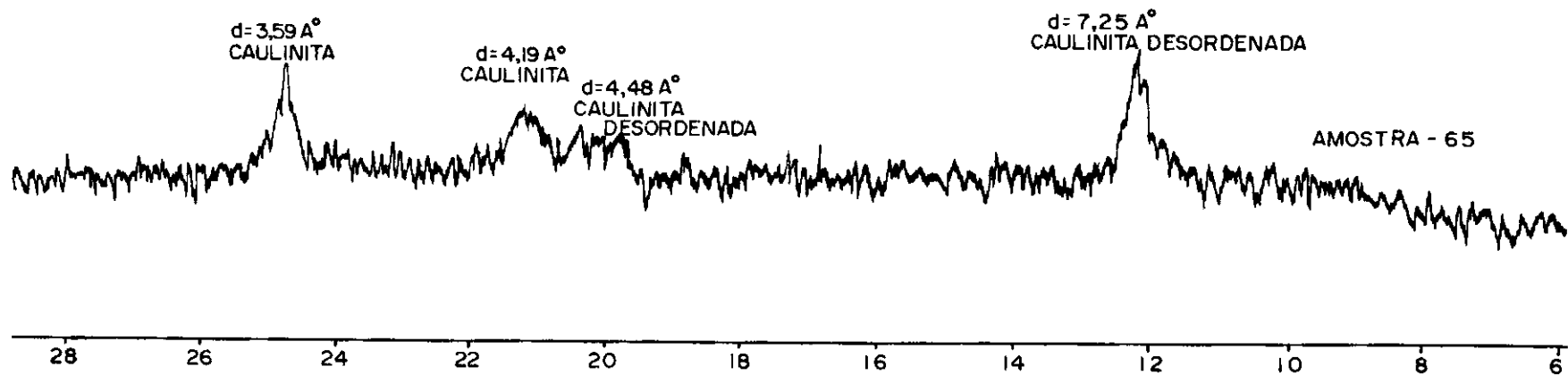
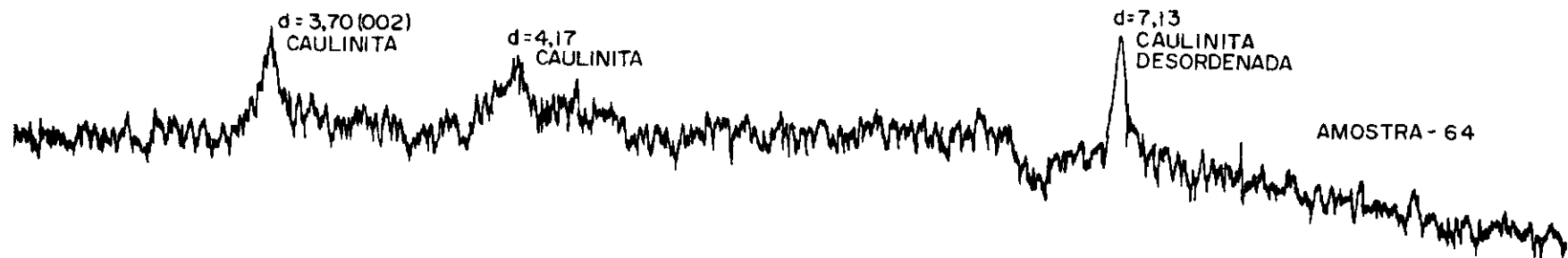
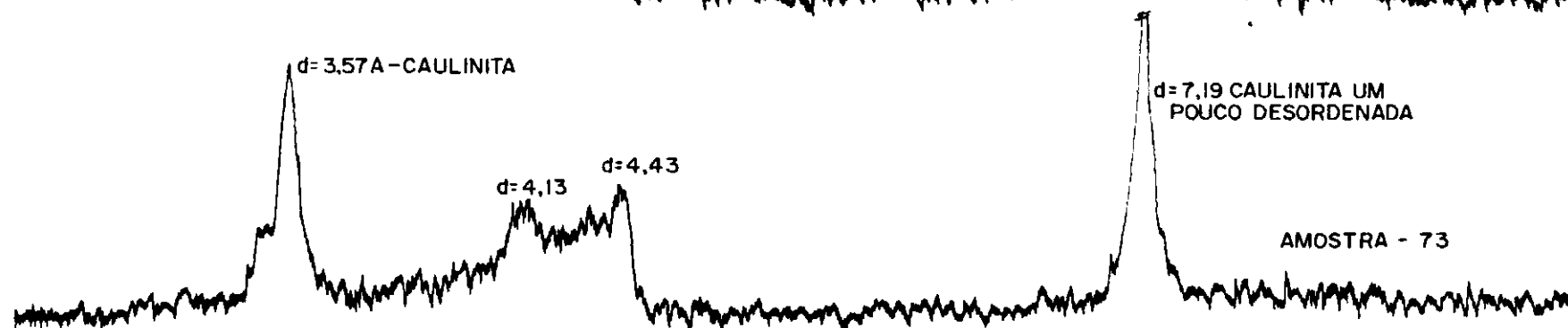
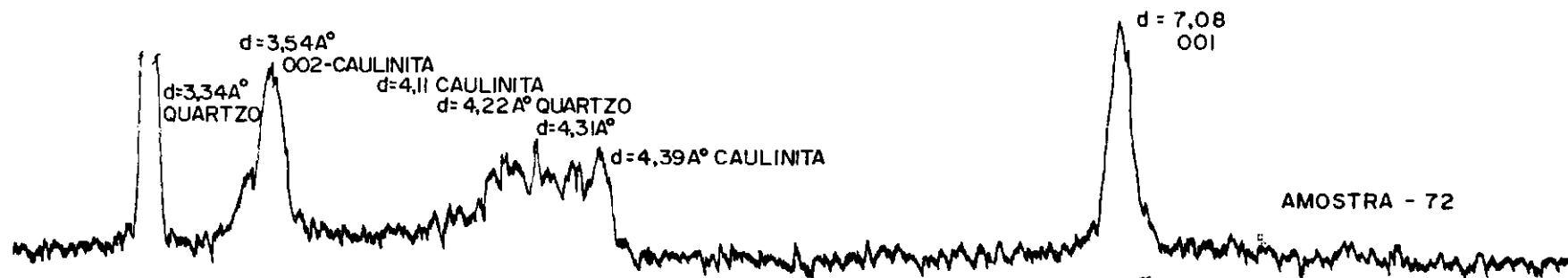
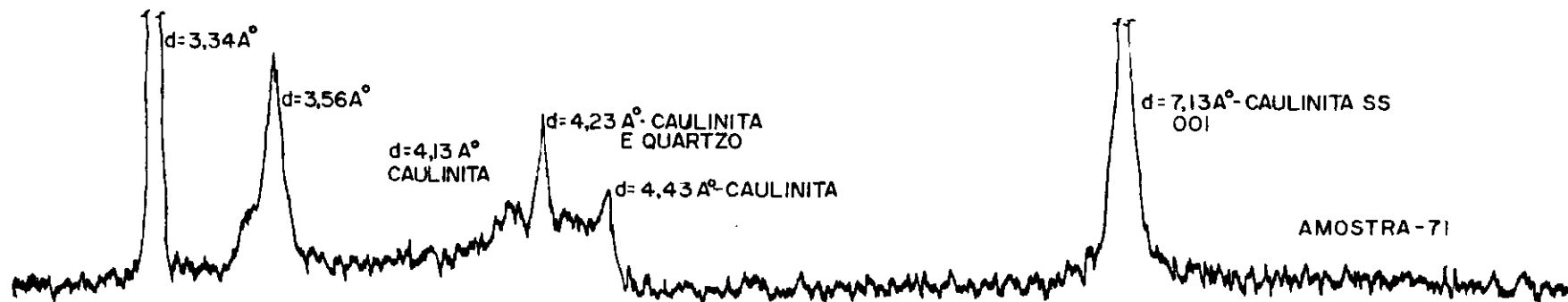
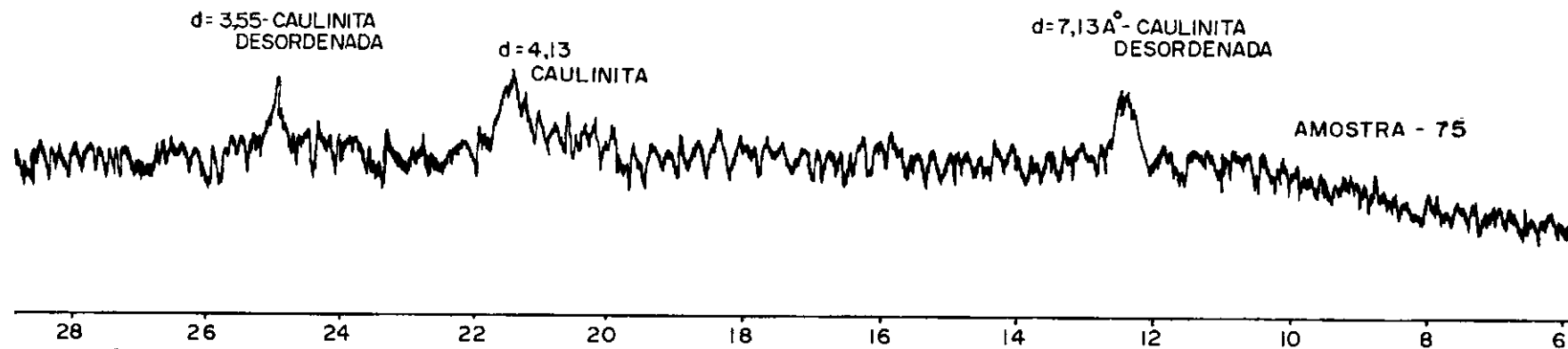
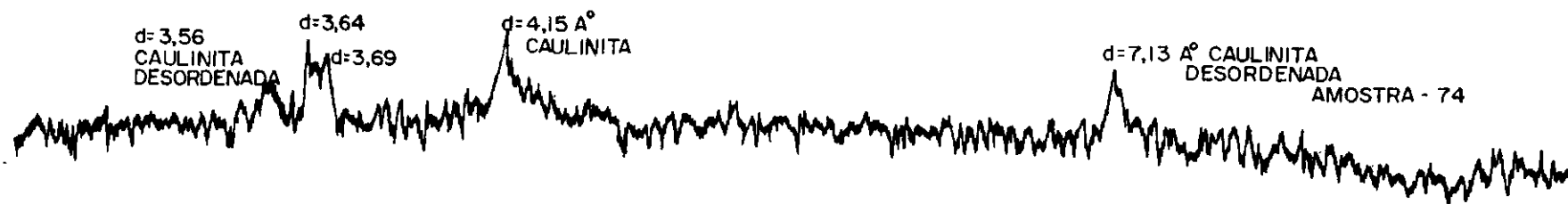


Figura C.13. Difratoigramas de raios-X para as subfrações da fração "solo" correspondente a jazida Sapé-Mari.



28 26 24 22 20 18 16 14 12 10 8 6

Figura C.14. Difractogramas de raios-X para as subfrações da fração "concreção" correspondente a ja zida Sapé-Mari.



Apêndice D

PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA O ESTUDO
NO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

Preparação das amostras para o estudo
no microscópio eletrônico de varredura.

As amostras de concreções lateríticas foram inicialmente quebradas e secadas ao ar. A superfície não fraturada foi aplainada e fixada ao porta-espécime para o uso no microscópio eletrônico de varredura. A superfície fraturada foi primeiramente tratada com cerca de 80 aplicações e remoções de fita adesiva, conforme sugerido por Barden e Sides (1971). (Este processo é conhecido pelo nome de "Peeling" (descascamento). A superfície foi posteriormente revestida com uma cobertura de prata de 100Å⁰ de espessura e examinada sob diferentes ampliações usando-se o microscópio eletrônico de varredura "Stereoscan Mark 2" da Cambridge Instrument Company.

Apêndice E

MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DA ÁREA ESPECÍFICA

1.0. Aparelhagem e materiais

- 1.1. Cápsulas de alumínio
- 1.2. Solução de glicerol a 2%
- 1.3. Estufas (duas)
- 1.4. Bastão de vidro
- 1.5. Cronômetro
- 1.6. Água destilada
- 1.7. Dessecador de amostra

2.0. Execução do ensaio

- 2.1. Colocar glicerol em uma estufa a 110°C para saturação.
- 2.2. Limpar as cápsulas de alumínio e colocar em outra estufa a 100°C verificando a constância de peso.
- 2.3. Colocar aproximadamente 0,2g de amostra na cápsula e levar a 110°C durante 48 horas.
- 2.4. Verificar a constância de peso, da cápsula com a amostra.
- 2.5. Adicionar 3 ml da solução de glicerol a 2% ao conjunto.
- 2.6. Com auxílio de bastão de vidro homogeneizar bem a amostra.
- 2.7. Colocar 2 ml da solução de $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ a 2%, ao conteúdo, cápsula + amostra, aproveitando para limpeza do bastão de vidro.
- 2.8. Colocar o conjunto em uma estufa saturada com glicerol (item 2.1.).
- 2.9. Pesar o conjunto de quatro em quatro horas até constância de peso. As pesadas devem ser realizadas no mesmo espaço de tempo (aproximadamente 20 segundos).

3.0. Cálculo da Área específica

$$\text{H}_8\text{C}_3\text{O}_3 = 92\text{g}$$

$$92\text{g} \text{ -- } 6,02 \times 10^{23} \text{ moléculas}$$

$$X \text{ (peso absorvido)} \text{ -- } Y \text{ moléculas}$$

$$1 \text{ (molécula)} \text{ -- } 26,9 \times 10^{-20} \text{ (m}^2\text{/g)}$$

$$Y \text{ (moléculas)} \text{ -- } A \text{ m}^2\text{/g}$$

ou

$$1,0\text{g (Glicerol)} \text{ -- } 17,65\text{m}^2\text{/g}$$

$$X \text{ (Glicerol absorvido)} \text{ -- } Y$$